www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

9e JAARGANG No. 5, blz. 125-160 MEI 1947

# Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: HET NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

## DE CONSTRUCTIE VAN DE PHILIPS-HEETELUCHTMOTOR

door F. L. van WEENEN.

621.412

Er worden een aantal mogelijke constructies behandeld, waarmee het heeteluchtproces kan worden verwezenlijkt. Het principieel eenvoudigste schema van een enkelvoudige motor (waarin zich maar één proces afspeelt) werkt met twee belaste zuigers, terwijl de warme en koude ruimte zoowel in één cylinder als gescheiden in twee cylinders (V-constructie) kunnen worden ondergebracht. De merites van beide oplossingen worden vergeleken. De klassieke heeteluchtmachines werkten in het algemeen met slechts één belaste zuiger en een verdringer. Het principe hiervan wordt toegelicht; twee mogelijke uitvoeringen worden besproken. Bij de eerste is de koude ruimte over twee cylinders verdeeld, bij de tweede is er maar één cylinder. Op de grondslag van het laatstgenoemde schema is de enkelvoudige Philips-heeteluchtmotor ontwikkeld, waarin alle vroeger besproken verbeteringen zijn gerealiseerd. Een reeks constructiedetails worden beschreven van deze motor, die in rendement en andere eigenschappen zooveel beter is dan de oude heeteluchtmachines, dat hij volkomen vergelijkbaar is met moderne motoren met inwendige verbranding, terwijl hij in sommige opzichten een aantal principieele voordeelen bezit. Voor grootere vermogens is de Philips meercylinder-heeteluchtmotor ontwikkeld, waarin zich een aantal heetelucht-cycli tegelijk afspelen. Door een geschikte combinatie der voor de cycli noodige systemen wordt bereikt, dat per systeem slechts één zuiger (dus geen afzonderlijke verdringer) noodig is. Hierdoor ontstaat een zeer eenvoudige constructie, terwijl men bovendien het voordeel heeft, dat de draairichting van de motor op eenvoudige wijze tijdens het bedrijf kan worden omgekeerd. Tevens zijn de zuigers nu dubbelwerkend geworden, waardoor het drijfwerk zeer laag belast wordt. Als een uitvoeringsvoorbeeld wordt een viercylindermotor met een tuimelschijf-mechanisme afgebeeld, welke constructie voor niet al te groote vermogens (hoogstens eenige tientallen PK) heel geschikt blijkt te zijn. Voor grootere vermogens zijn andere constructies ontwikkeld, waarbij gebruik gemaakt wordt van een krukas-mechanisme. De mechanische oplossingen voor deze verschillende motoren zullen in latere artikelen worden behandeld.

De theoretische grondslagen van de heeteluchtmotor zijn in een artikel in de vorige jaargang van dit tijdschrift behandeld [1]). In een tweede artikel [2]), dat we zullen aanhalen als „II", zijn onlangs nadere mededeelingen gedaan omtrent de inzichten die het bij Philips verrichte onderzoek van het heeteluchtproces heeft opgeleverd. Uit deze inzichten zijn eenige nieuwe constructieprincipes afgeleid, die de ontwikkeling van de Philips-heeteluchtmotor, met zijn gunstige eigenschappen, hebben mogelijk gemaakt. We willen thans de constructie van verschillende uitvoeringsvormen van deze motor nader beschrijven. Eerst zullen we ons bezig houden met enkelvoudige uitvoeringen, die kunnen worden vergeleken met een ééncylinder-verbrandingsmotor. Teneinde grootere vermogens te ontwikkelen en gebalanceerde constructies te verkrijgen, kunnen verscheidene enkelvoudige machines, die men op eenzelfde as laat werken, tot een meervoudige motor worden gecombineerd, evenals het geval is bij meercylinder-verbrandingsmotoren. (De aanduiding „meercylindermotor" willen we voor de meervoudige heeteluchtmotor hier om zekere redenen nog niet gebruiken.) Bij de ontwikkeling van de meervoudige heeteluchtmotor is een ingrijpende vereenvoudiging en verbetering mogelijk gebleken, die tot zeer elegante constructies leidt.

### Enkelvoudige motoren

*Het principeschema*

*Fig. 1* laat het eenvoudige schema zien, dat ook in de voorafgaande artikelen werd gebruikt om de verwezenlijking van het heeteluchtproces toe te lichten. Men ziet de „warme ruimte" $V_w$ en de „koude ruimte" $V_k$, die in open verbinding met elkaar staan via verhitter, regenerator en koeler. In het onderschrift zijn de vier etappes van het heeteluchtproces: expandeeren van het arbeidsmedium, afkoelen, comprimeeren en verhitten, beschreven. Het arbeidsmedium is meestal lucht, maar het kan ook waterstof, helium, argon, of een ander gas zijn. Voor een goed begrip van hetgeen volgt zij

[1]) H. Rinia en F. K. du Pré, Heeteluchtmotoren, Philips techn. T. 8, 129-136, Mei 1946.
[2]) H. de Brey, H. Rinia en F. L. van Weenen, De grondslagen voor de ontwikkeling van de Philips-heeteluchtmotor, Philips techn. T. 9, 97-104, April 1947.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



er aan herinnerd, dat de genoemde vier etappes bij sinusvormig bewegende zuigers niet streng gescheiden zijn doch gedeeltelijk over elkaar heen vallen, maar dat de machine toch met bijna onveranderd vermogen en rendement als motor blijft werken, mits de bewegingen der twee zuigers ongeveer 90° in fase verschillen, en wel zoodanig dat de volumevariaties van de warme ruimte vóór loopen ten op-

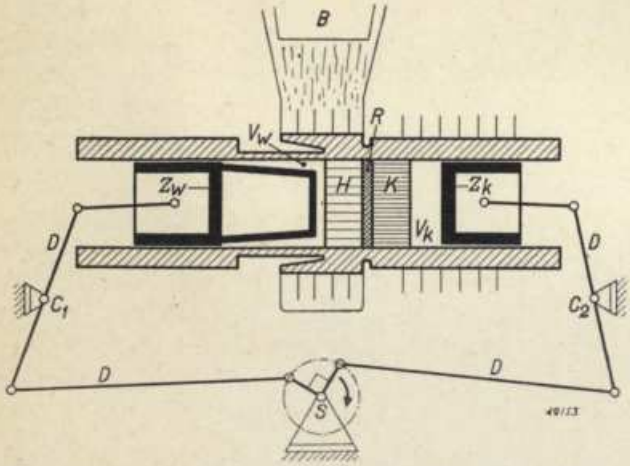



Fig. 1. Schema van een heeteluchtmotor. Het heete arbeidsmedium (bijv. lucht) in de warme ruimte $V_w$ expandeert en verricht daarbij arbeid op de warme zuiger $Z_w$. Daarna wordt het via de regenerator $R$, waar het zijn warmte in bewaring geeft, naar de koude ruimte $V_k$ overgebracht en hier door de koude zuiger $Z_k$ tot het oorspronkelijke volume gecomprimeerd. Hiervoor is arbeid noodig, maar, wegens de lagere temperatuur en dus lagere druk, minder dan bij de expansie werd gewonnen, waarbij de lucht zich immers op hooge temperatuur en dus hooge druk bevond. Vervolgens wordt de lucht via de regenerator, waar zij de opgeslagen warmte weer opneemt, naar de warme ruimte teruggebracht en de kringloop begint opnieuw. De koeler $K$ en de verhitter $H$, welke laatste door de brander $B$ wordt verhit, zorgen er voor dat het gewenschte temperatuurverschil tusschen warme en koude ruimte gehandhaafd wordt. Het drijfwerk (drijfstangen $D$, vaste draaipunten $C_1$, $C_2$, krukas $S$) is zoo geconstrueerd dat de volumes $V_w$ en $V_k$ met ongeveer 90° faseverschil varieeren.

zichte van die der koude ruimte. Voorts zij er op gewezen, dat de momenteele druk, dank zij de open verbindingen, in principe overal in de motor even groot is: naarmate het arbeidsmedium van de koude naar de warme ruimte verplaatst wordt en omgekeerd, stijgt resp. daalt de druk in de motor in zijn geheel.

*Eenvoudig model*

Het is mogelijk een heeteluchtmotor geheel volgens het schema van fig. 1 te bouwen. Het is zelfs aanlokkelijk om het zoo te probeeren, want theoretisch, wat het proces in de cylinder zelf betreft, is dit wel de gunstigste vorm die men kan bedenken. In II is uiteengezet, dat bij de constructie van de verhitter, regenerator en koeler een compromis moet worden gesloten tusschen de warmteoverdracht eenerzijds, de stroomingsweerstand en de schadelijke ruimte anderzijds, en dat de juiste keuze van dit compromis essentieel is voor het verkrijgen van een goed rendement. In fig. 1 heeft men een zeer gunstige situatie voor de luchtstrooming: een korte, rechte verbinding met groote doorsnede tusschen $V_w$ en $V_k$; en men heeft hier de mogelijkheid om de schadelijke ruimte tot het minimum te beperken. Dit was voor ons aanleiding om terwille van het onderzoek, dat zich in het begin voornamelijk op de genoemde punten richtte, werkelijk een motortje volgens het schema van fig. 1 te construeeren. In *fig. 2* is dit proefmodel afgebeeld.

De nadeelen, die maken dat deze constructie practisch toch weinig beteekenis heeft, zijn van mechanische aard. Het drijfwerk is tamelijk ingewikkeld. Het onderbrengen van het drijfwerk in een gesloten huis (carter), zooals men bij verbrandingsmotoren om allerlei voor de hand liggende redenen, o.a. ter verkrijging van een goede smering, algemeen pleegt te doen, vereischt omvangrijke en dure constructies. Voorts kan de constructie, met de twee langs eenzelfde lijn, echter met een zeker faseverschil, bewegende zuigers, niet eenvoudig gebalanceerd worden — een bezwaar dat zich bij iedere normale één-cylindermotor voordoet en dat vooral zwaar weegt als men een motor met hoog toerental en/of groot vermogen wil bouwen. Ten slotte is het voor

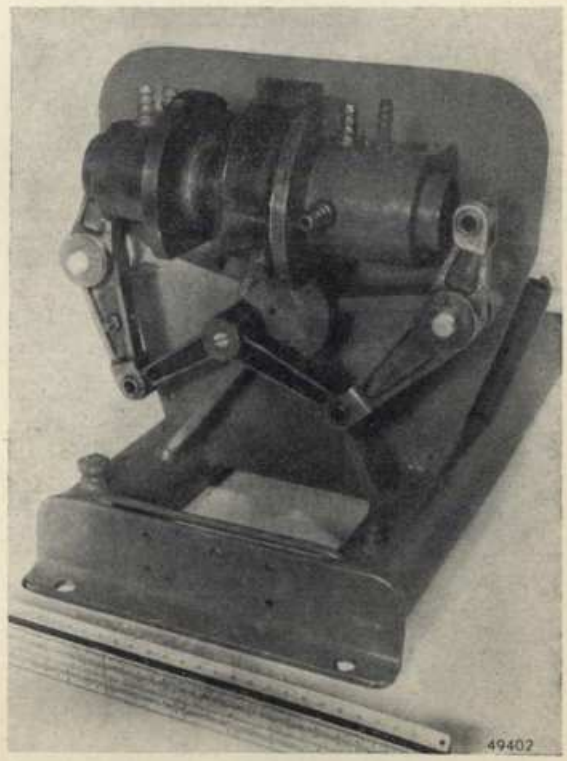



Fig. 2. Proefmodelletje van een heeteluchtmotor, geconstrueerd volgens het schema van fig. 1. De ligging der onderdeelen is dezelfde als in fig. 1.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



het mechanisch rendement zeer nadeelig dat de geschetste constructie met twee belaste zuigers werkt: aan weerskanten van elke zuiger heerschen verschillende drukken. Om het lekken langs de zuigers te beperken, is een zeer goede dichting noodig, die wrijvingsverliezen tengevolge heeft. Deze verliezen maakten, dat bij de klassieke heeteluchtmachines, met hun toch al zeer lage rendement, een constructie volgens fig. 1 nauwelijks mogelijk was. Vrijwel steeds is daar een geheel ander schema toegepast, waarbij slechts één belaste zuiger te pas komt; we komen straks uitvoerig hierop terug. Voor ons proefmodel was de situatie iets gunstiger: er waren reeds verscheidene nieuwe ideeën in verwerkt, die ten deele in II besproken zijn, en het rendement was er zoo door verbeterd, dat het motortje wel functionneerde. Maar het bood toch weinig vooruitzichten, ten deele wegens de eerder genoemde bezwaren, doch vooral wegens de twee belaste zuigers. Immers het doel om grootere vermogens met een behoorlijk hoog rendement en hoog specifiek vermogen op te wekken, maakte een verhooging van het drukniveau in de motor wenschelijk; parallel hiermee stijgen de eischen, gesteld aan de dichting der beide zuigers, en men komt dus tot nog hoogere wrijvingsverliezen.

*De V-constructie*

Een aantal der in het voorgaande genoemde mechanische nadeelen wordt vermeden door van het schema fig. 1 over te gaan tot *fig. 3*. De twee cylinderhelften in fig. 1 die de warme resp. koude ruimte bevatten, zijn hier tot zelfstandige cylinders gemaakt, waarvan de assen onder een hoek van bijv. 90° ten opzichte van elkaar staan. Bij deze „V-constructie" is het drijfwerk veel eenvoudiger, er is een gesloten carter mogelijk, en het blijkt dat de motor gemakkelijk nagenoeg geheel gebalanceerd kan worden. Heeft men nl. maar één zuiger, die door zijn heen- en weergaande beweging een wisselende versnellingskracht, evenwijdig aan de cylinderas, op het drijfwerk overbrengt, dan kan men deze kracht wel volledig compenseeren met behulp van een om de krukas roteerend contragewicht [3]). Dit introduceert echter een nieuwe, even groote en met dezelfde frequentie wisselende kracht, die loodrecht staat op de oorspronkelijke; immers, de centrifugale kracht van een roteerend contragewicht kan in twee loodrecht op elkaar staande, wisselende krachten, met een onderling faseverschil van 90°, worden ontbonden. Men is bij deze „compensatie" dus feitelijk niets opgeschoten. Heeft men nu echter twee gelijke zuigers, waarvan de bewegingsrichtingen loodrecht op elkaar staan en die met een faseverschil van 90° bewegen — dit is juist het geval bij onze V-constructie —, dan kunnen omgekeerd de twee wisselende massakrachten der beide zuigers tot een enkele roteerende kracht van constante grootte worden samengesteld. Deze resulteerende kracht op de krukas kan derhalve door een in tegengestelde richting werkend contragewicht volledig opgeheven worden.

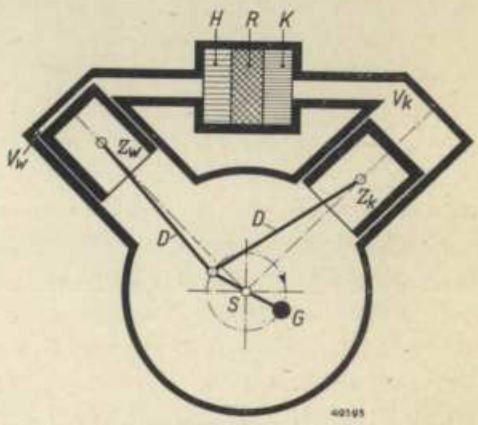



Fig. 3. Schema van een heeteluchtmotor volgens de zg. V-constructie. Beteekenis der letters als in fig. 1, *G* = contragewicht. Voordeelen: eenvoudiger drijfwerk, gesloten carter (met eventueel verhoogde druk), gebalanceerde massakrachten der zuigers.

Het nadeel van de twee belaste zuigers, waarvan bij het schema fig. 1 gewag werd gemaakt, bestaat bij de V-constructie eveneens. Het weegt hier echter minder zwaar, daar men in het geval van een verhoogd drukniveau, waarbij de dichtings- en wrijvingsverliezen op de voorgrond treden, het carter onder druk kan zetten, waardoor de genoemde verliezen sterk worden beperkt. Wij zullen hieronder, naar aanleiding van een andere constructie, deze methode uitvoerig bespreken en volstaan hier met de opmerking, dat dank zij deze en de andere beschreven verbeteringen deze V-constructie heel geschikt is voor snel loopende motoren van klein vermogen (bijv. minder dan 1 PK), waarbij het rendement nog geen doorslaggevende rol speelt.

*Constructies met verdringer*

We merkten reeds op, dat de klassieke heeteluchtmachines vrijwel steeds slechts één belaste zuiger hadden. Dit was mogelijk door het gebruik van een verdringer: een tusschen de warme en de koude ruimte geplaatst lichaam, dat (op zijn minst) eenzelfde volume inneemt als de warme resp. koude

[3]) Streng geldt dit alleen bij een drijfwerk met oneindig lange drijfstang. Bij eindige lengte van deze stang beweegt de zuiger niet zuiver sinusvormig, maar bevat zijn beweging hoogere harmonischen, die wegens hun hoogere frequentie nooit door een met de grondfrequentie roteerend gewicht uitgebalanceerd kunnen worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



ruimte maximaal heeft. Door dit verdringerlichaam periodiek heen en weer te bewegen, noodzaakt men de lucht, tusschen de warme en de koude ruimte heen en weer te stroomen. De verdringer is onbelast, daar, zooals we hierboven hebben gezien, op elk oogenblik de druk in de koude ruimte in principe even hoog is als in de warme ruimte [4]). De koude ruimte is door een normale zuiger van de buitenlucht afgesloten. Deze eene zuiger dient nu zoowel voor het winnen van arbeid bij de expansie als voor het toevoeren van arbeid bij de compressie.

Doordat de drukken aan weerskanten van de verdringer niet verschillen, is er geen zorgvuldige dichting tusschen de verdringer en de cylinderwand noodig en behoeven hier dus geen groote wrijvingsverliezen te ontstaan. Ja, men kan zelfs — al is dit volgens onze tegenwoordige inzichten volstrekt niet aanbevelenswaardig — langs of dóór de verdringer kanalen vrij laten, waar de lucht bij het heen en weergaan tusschen koude en warme ruimte doorheen stroomt; we zullen straks een constructie bespreken van ongeveer 80 jaren her, toen men vrij algemeen zoo te werk ging. Maar ook bij de constructies waarbij warme en koude ruimte een verbinding „buitenom" hebben, blijft het van kracht, dat de dichting van de verdringer slechts aan matige eischen behoeft te voldoen en dat hier dus geen groote wrijvingsverliezen behoeven te ontstaan.

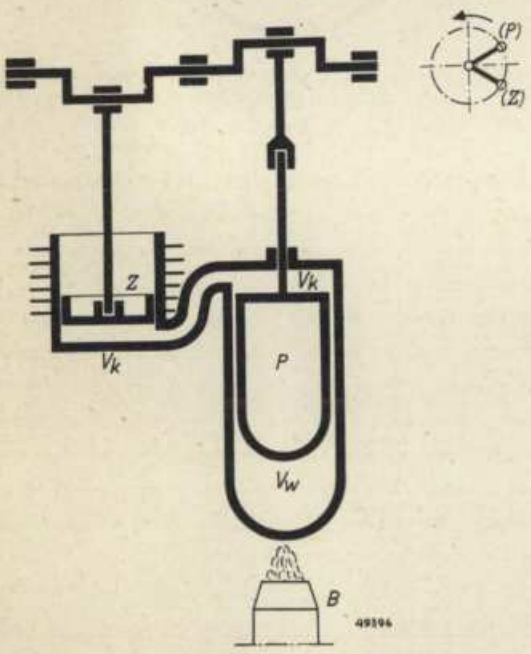



Fig. 4. Schema van een klassieke heeteluchtmachine, met slechts één belaste zuiger ($Z$) en een verdringer ($P$). Het arbeidsmedium stroomt hier langs de verdringer heen en weer tusschen de warme ruimte $V_w$ en de koude ruimte $V_k$. De warmtebron $B$ correspondeert met de brander in fig. 1.

[4]) In werkelijkheid is er een klein drukverschil, ten gevolge van de stroomingsverliezen. Ook is er een gering verschil in de oppervlakken waarop de drukken aan weerskanten op de verdringer werken: aan de zijde waar de drijfstang op de verdringer bevestigd is, komt de stangdoorsnede op dit oppervlak in mindering. De door een en ander overblijvende stangkracht is echter zeer klein. De beweging van de verdringer gaat dus vrijwel niet met verlies (noch winst) van arbeid gepaard.

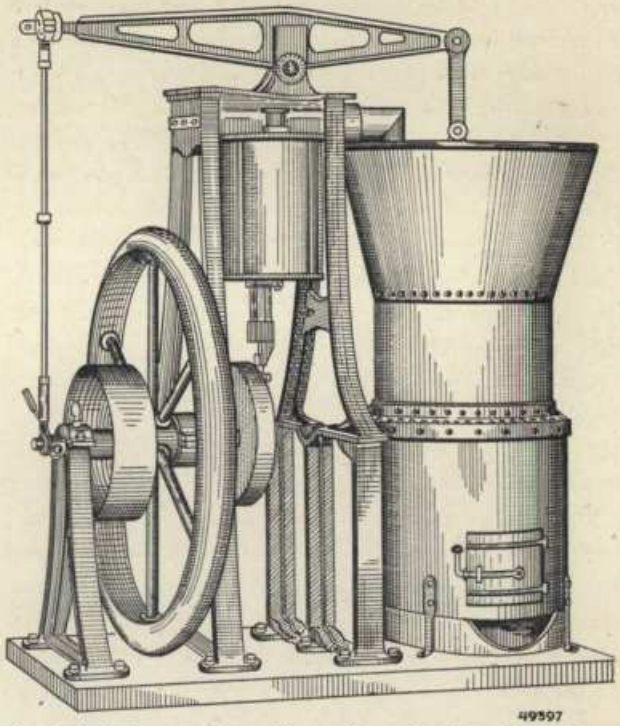



Fig. 5. Oude heeteluchtmachine, gebouwd volgens het schema van fig. 4. Het groote vat rechts bevat de verdringer en, onderin, de warme ruimte. In de kleinere cylinder in het midden beweegt de belaste zuiger. De aandrijving van de verdringer geschiedt, afwijkend van het vereenvoudigde schema fig. 4, via een groote balanceerstang, die men ook op prenten van oude stoommachines geregeld aantreft. (Geteekend naar een gravure uit de jaargang 1882 van het tijdschrift „De Natuur".)

Dit voordeel komt vooral tot zijn recht, indien de aandrijving van de verdringer zoo geconstrueerd wordt, dat geen belangrijke zijdelingsche krachten op de verdringer kunnen optreden.

Het principe van een heeteluchtmotor met verdringer kan op verschillende wijzen worden verwezenlijkt. Een vroeger zeer gebruikelijke opstelling is in *fig. 4* schematisch weergegeven. Zij werd reeds in 1817 door Stirling toegepast. In *fig. 5* vindt men een afbeelding van een heeteluchtmachine van omstreeks 1880, die volgens dit schema is gebouwd: een machine van ca $1^1/_2$ m hoog, die een vermogen van ongeveer 1 PK leverde, bij een zeer slecht rendement en laag toerental. Maar hetzelfde type komt ook nog voor bij de tot heden vervaardigde kleine heeteluchtmachientjes, die o.a. weleens gebruikt worden als aandrijving voor roerwerktuigen in chemische laboratoria, als speelgoed, enz.

Uit het artikel II zal voldoende duidelijk geworden zijn, wat de oorzaken waren van de slechte eigenschappen dezer oude machines, die hen het onderspit hebben doen delven tegen de motoren met inwen-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



dige verbranding. Wij noemen hier slechts enkele van de in dat artikel gesignaleerde gebreken. Verhitter en koeler waren zeer primitief (vgl. fig. 4 en 5). De verhitting geschiedde door een vuurhaard onder de warme ruimte te plaatsen. De wand hiervan kon geen zeer hooge temperatuur verdragen. De koeling had plaats door warmte-uitwisseling met een koelwatermantel via de wand van de koude ruimte. Bij vele oude constructies was geen regenerator aanwezig; zoo bijv. ook in het schema fig. 4, waar het arbeidsmedium, op de beschreven wijze, langs de verdringer moet stroomen om van de warme naar de koude ruimte te komen en omgekeerd. Alleen de cylinderwand tegenover de verdringer vervult hier — zeer gebrekkig — de taak van de regenerator: de uit de koude ruimte komende lucht ontvangt hier althans een deel terug van de warmte, die zij een halve periode eerder, uit de warme ruimte komend, aan de wand heeft afgestaan.

Het zou mogelijk geweest zijn de door ons onderzoek verkregen nieuwe inzichten op het schema fig. 4 in toepassing te brengen. Wij hebben dit niet gedaan, daar aan dit schema nog een principieel nadeel kleeft: de koude ruimte is over twee cylinders verdeeld. Daar de zuiger en de verdringer zeker niet met een faseverschil van 180° kunnen bewegen — immers, dan zouden de volumevariaties van warme en koude ruimte 180° in fase verschillen [5]) en de machine zou niet werken — worden de beide gedeelten van de koude ruimte nooit gelijktijdig nul. De kleinste waarde van het koude volume is dus grooter dan nul, hetgeen o.a. een hinderpaal vormt voor het bereiken van een hoog specifiek vermogen.

Een betere opstelling met verdringer is in *fig. 6* afgebeeld. De koude ruimte is hier niet verdeeld over twee cylinders, en door een geschikte keuze van de slaglengten en het onderlinge faseverschil van zuiger en verdringer kan men bereiken dat zoowel het warme als ook het koude volume eenmaal per omwenteling nul worden [6]).

De conclusie uit het bovenstaande is, dat het in fig. 6 weergegeven schema geacht moest worden de beste vooruitzichten te bieden. Aan dit motortype werden dan ook in de Philips-laboratoria aanvankelijk de meeste proefnemingen verricht. Deze hebben geleid tot een uitvoeringsvorm, waarin alle in II beschreven principieele, en nog diverse incidenteele, verbeteringen zijn toegepast. De aldus verkregen nieuwe motor willen we nu nader beschouwen.

*De enkelvoudige Philips-heeteluchtmotor*

Volledigheidshalve geven wij eerst een kort overzicht van de in II besproken nieuwe constructieprincipes die in deze motor zijn toegepast: overgang tot hooge drukken en tot een hooge temperatuur van de warme ruimte, mogelijk gemaakt door de

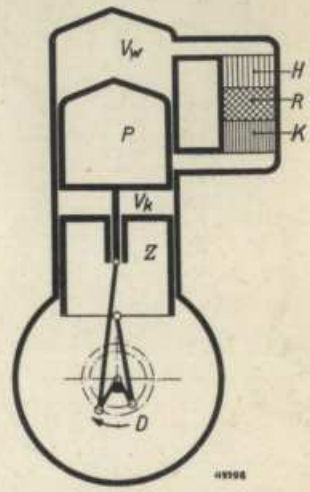



Fig. 6. Schema van een heeteluchtmachine met verdringer, waarbij slechts één cylinder wordt gebruikt. Beteekenis der letters als in fig. 4 resp. fig. 1.

toepassing van hittebestendige, kruipvaste staallegeeringen; doelmatige constructie van de verhitter, koeler en regenerator, zoodat een voldoend snelle warmte-overdracht wordt verkregen en toch de schadelijke ruimte en de stroomingsweerstand (bij de hooge toerentallen, in de Philips-motoren toegepast) niet te groot worden; beperking van de schoorsteenverliezen door het aanbrengen van een doelmatige voorverhitter; algemeene beperking van warmteverliezen door kleine compacte bouw; algemeene beperking van wrijvingsverliezen door kleine lichte bouw.

In *fig. 7* zijn de belangrijkste details van de motor te zien. De verhitter, regenerator en koeler zijn niet in een afzonderlijk verbindingskanaal tusschen de warme en de koude ruimte aangebracht, zooals wellicht het meest voor de hand ligt en zooals ook in fig. 6 werd aangegeven, maar deze elementen zijn in ringvorm om de cylinder heen geplaatst. Hierdoor wordt een zeer compacte opstelling verkregen, terwijl door het ontbreken van toevoerkanalen onnoodige stroomingsweerstand en schadelijke ruimte vermeden zijn. De verhitter, welks begrenzing aan de binnenzijde gevormd wordt door een dunwandige cylindrische bus van hittebestendig metaal,

[5]) Uitgezonderd bij 180°, is het faseverschil tusschen de volumevariaties van warme en koude ruimte steeds grooter dan het faseverschil tusschen zuiger- en verdringer-beweging. Bij de in fig. 4 gekozen hoek tusschen de krukken is het laatstgenoemde faseverschil 60°, het eerste 120°.

[6]) Een constructie met zuiger en verdringer in één cylinder is reeds tamelijk oud; zij werd omstreeks 1860 door Lehmann toegepast.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



mondt rechtstreeks uit in de warme ruimte. De verhitter wordt uitwendig met behulp van een brander verhit. De koude ruimte staat met de koeler in verbinding via een krans van poorten in de wand van die ruimte. Voor nadere bijzonderheden van

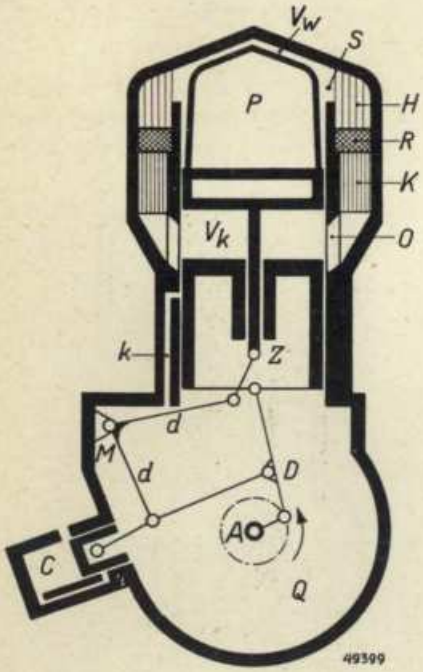



Fig. 7. Doorsnede van de enkelvoudige Philips-heeteluchtmotor. Warme en koude ruimte $V_w$ resp. $V_k$ in één cylinder, onderling gescheiden door verdringer $P$ met isolatiedop. Verhitter $H$, regenerator $R$ en koeler $K$ ringvormig om cylinder heen gebouwd, $S$ uitmonding van verhitter in $V_w$, $O$ poorten tusschen koeler en $V_k$. Drijfstang $D$ van zuiger $Z$ en drijfwerk $d$ van verdringer ondergebracht in gesloten carter $Q$, waarin lucht op minimum druk van de kringloop in cylinder. Aandrijving $d$, met vast draaipunt $M$, zoodanig, dat op de verdringer slechts uiterst kleine zijdelingsche krachten werken. Teruglevering aan cylinder van naar het carter gelekte lucht, via het kanaaltje $k$. $C$ = perspompje, $A$ = motoras.

de constructie van de verhitter, koeler en regenerator (en van de voorverhitter) zij verwezen naar II.

Het onderste gedeelte van de verdringer is van een loopvlak voorzien, terwijl de verdringer aan de kant van de warme ruimte uit een dunwandige dop bestaat die eenige speling in de cylinder heeft (zie fig. 7). Deze dop, die gemaakt is van hittebestendig, slecht warmtegeleidend materiaal (chroomnikkelstaal), vervult een belangrijke functie. Via de dunne, slecht geleidende dopwand vloeit slechts een geringe warmtestroom van de heete bovenzijde naar de koude onderzijde. Ook door de dunne gaslaag in de ringvormige ruimte tusschen de dop en de cylinderwand vindt slechts een minimaal warmtetransport plaats. Zoo wordt het warmteverlies, dat de verdringer in principe zou kunnen meebrengen, beperkt. Nog belangrijker is echter, dat dank zij deze isoleerende werking van de dop het loopvlak van de verdringer koud blijft. Hierdoor vermijdt men alle moeilijkheden wat betreft dichting, slijtage, enz. waarmee men bij heete loopvlakken te worstelen heeft.

Er dient op gewezen te worden dat het aan de aard van het heeteluchtproces te danken is dat de beschreven dopconstructie hier geen moeilijkheden oplevert. Bij motoren met inwendige verbranding zou door de optredende zeer hooge verbrandingstemperaturen het materiaal van een dergelijke dop te spoedig bezwijken. Speciaal bij benzinemotoren zou de heete dop verder aanleiding geven tot vóórontbranding van het brandstof-lucht-mengsel. Bovendien zou de smalle spleet tusschen de dop en de cylinderwand spoedig door de afzetting van kool of andere verbrandingsproducten verstopt geraken, waardoor de wrijving zou toenemen en het zuigerloopvlak aan beschadiging zou blootstaan.

De motor is voorzien van een gesloten carter. De lucht in het carter wordt door middel van een pompje ($C$ in fig. 7), dat lucht van buiten in het carter perst en dat door de motor wordt aangedreven, op een regelbare druk gehouden, en wel wordt de druk in het carter gelijk gemaakt aan de minimum druk die bij de cyclus in de motor optreedt. Wil men de motor bijv. met een topdruk van 20 atm en een laagste druk van 8 atm laten werken, dan wordt dus het carter op 8 atm gebracht. Deze maatregel levert belangrijke voordeelen op. Het grootste drukverschil aan de zuiger wordt er aanzienlijk door beperkt (in het genoemde voorbeeld tot 12 atm, terwijl het bij een carter op atmosferische druk 19 atm zou bedragen), het lekken langs de zuiger wordt verminderd, de dichting wordt vergemakkelijkt en veroorzaakt minder wrijving. De lucht die bij de topdrukken langs de zuiger weglekt, wordt bij deze constructie uit het carter naar de werkruimte teruggeleverd door een kanaaltje ($k$ in fig. 7), dat in de onderste stand van de zuiger (toestand van ongeveer minimale druk) werkruimte en carter even in open verbinding brengt. Terwijl bij de normale constructie, met een carter onder atmosferische druk, de terug te leveren lucht telkens eerst tot de minimum druk (in casu 8 atm) zou moeten worden gecomprimeerd, kost het suppleeren thans veel minder arbeid. Naar de buitenlucht is nu alleen een lek mogelijk uit het carter langs de motor-as ($A$ in fig. 7). Om deze lek tegen te gaan wordt een asdichting van een gebruikelijke soort toegepast.

We zeiden zoojuist, dat de druk in het carter gelijk gemaakt wordt aan de minimum druk van de cyclus. In werkelijkheid is het eigenlijk omgekeerd: door de open verbinding in de laagste zuigerstand wordt de minimum druk van de cyclus automatisch gelijk aan de carterdruk. Derhalve kan, door instelling

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



van de carterdruk met behulp van het perspompje, zeer eenvoudig het drukniveau en daarmee het vermogen van de motor worden geregeld.

Is de motor lange tijd niet in gebruik geweest, dan kan de druk in het carter door de eventueele geringe lek naar buiten tot de atmosferische druk zijn gedaald. Na het weer in bedrijf stellen levert dus de motor aanvankelijk slechts een gering vermogen, dat echter in zeer korte tijd tot de gewenschte waarde stijgt, doordat het pompje in werking treedt en hierdoor de druk in het carter snel op de gewenschte waarde wordt gebracht.

Ten slotte levert de verhoogde druk in het carter nog een niet te verwaarloozen voordeel op wat betreft het mechanisch nuttig effect van de motor. Doordat nl. het wisselende verschil in druk aan weerskanten van de zuiger met een constant bedrag verlaagd wordt, krijgt men ook dienovereenkomstig kleinere stangkrachten die op de krukas worden overgebracht. Men heeft dus met een kleinere lagerbelasting te maken en de wrijvingsverliezen zijn derhalve geringer. (Een soortgelijk effect in nog geprononceerder vorm zullen we bij de meervoudige motor tegenkomen.)

In *fig. 8* is een foto van een motor van het beschreven type weergegeven. Aan deze proefmotor zijn talrijke metingen verricht om zijn eigenschappen te onderzoeken. Hierop zal in een afzonderlijk artikel worden teruggekomen. Op deze plaats willen we slechts constateeren, dat dit motortype thans een behoorlijk rendement oplevert, vele malen beter dan men vroeger van heeteluchtmachines gewend was. Het type is geschikt voor vermogens van enkele PK en niet al te hooge toerentallen (bijv. tot 2000 omw/min). Deze laatste beperking heeft zijn oorzaak hierin, dat de motor, evenals bij het primitieve model in fig. 2 werd vermeld en zooals bij alle soorten eencylindermachines het geval is, niet eenvoudig kan worden gebalanceerd. De wenschelijkheid hiervan en de overgang tot grootere vermogens brengt ons naar de meervoudige motoren.

### Meervoudige motoren

Hoewel de resultaten, bereikt met de enkelvoudige motoren, al zeer bevredigend waren, kreeg de ontwikkeling nog een nieuwe krachtige stimulans, toen bleek dat een zeer belangrijke vereenvoudiging van de constructie mogelijk was bij meervoudige of meercylindermotoren.

We moeten hier even bij de aanduiding „meercylindermotor" stilstaan. In het voorgaande hebben wij gezien, dat sommige types van enkelvoudige motoren twee cylinders bezitten (fig. 3, 4), andere slechts één cylinder (fig. 1, 6, 7). Al deze motoren konden we enkelvoudig noemen, omdat zij slechts één „systeem", bestaande uit koude ruimte-koeler-regenerator-verhitter-warme ruimte, bezaten. Bij de thans te beschrijven meervoudige Philips-heeteluchtmotor is echter het aantal cylinders steeds gelijk aan het aantal systemen, zoodat bijv. een aanduiding als „viercylindermotor" geen misverstand meer kan doen ontstaan.

De genoemde vereenvoudiging heeft betrekking op de wijze waarop verscheidene systemen tot een meervoudige motor worden gecombineerd. In *fig. 9* is het principe hiervan aangegeven, voor het geval van een viercylindermotor. In elk der vier cylinders bevindt zich een warme ruimte (boven) en een koude ruimte (beneden). In afwijking van wat men wellicht zou verwachten, vormen echter niet de warme en koude ruimte in elke cylinder een samenwerkend systeem, doch de warme ruimte van een cylinder is telkens — via een verhitter, regenerator en koeler — verbonden met de koude ruimte van de daaropvolgende cylinder [7]). We kunnen een der-

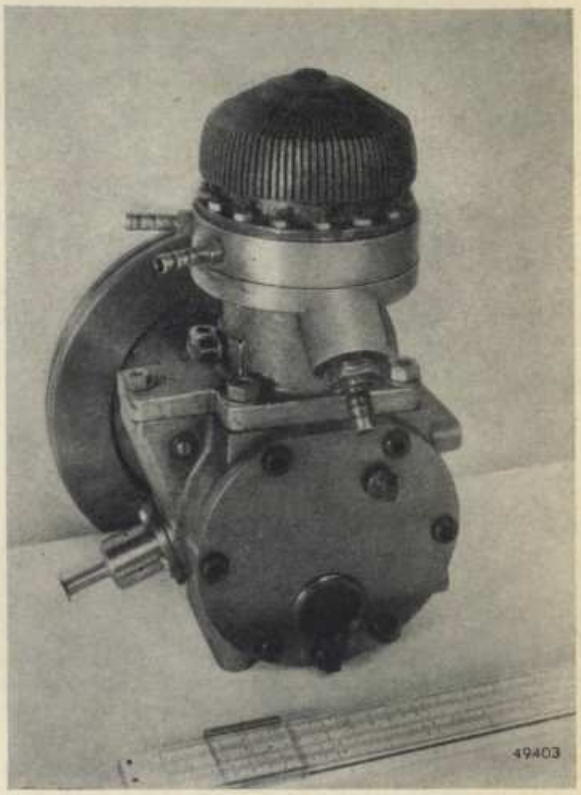



Fig. 8. Foto van een proefmodel van de enkelvoudige Philips-heeteluchtmotor, geconstrueerd volgens het schema fig. 7. Bovenaan ziet men de warmte-uitwisselaar van de brander, die om de verhitter heen is aangebracht (vgl. het artikel II). Links onderaan het pompje, waarvan de persdruk met de uitstekende schroef geregeld kan worden. Achter de motor ziet men het vliegwiel.

[7]) Dit principe is reeds beschreven door H. Rinia, in het artikel: New possibilities for the air engine, Proc. Kon. Ned. Akad. Wet. Amsterdam **49**, 150-155, Febr. 1946.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



gelijke opstelling vergelijken met bijv. fig. 3 en evenals daar kunnen wij onmiddellijk constateeren dat de beide zuigers, waartusschen het systeem zich bevindt, bij de expansie in het systeem meer arbeid aan de motor-as zullen leveren dan zij bij de compressie in het systeem op het arbeidsmedium moeten verrichten, mits volgens de meervermelde voorwaarde de volumevariaties van de warme ruimte (in de eerste cylinder) in fase vóór loopen bij de variaties van de koude ruimte (in de tweede cylinder). Men ziet gemakkelijk dat dit gewaarborgd is indien de zuiger van de tweede cylinder vóór loopt bij die van de eerste — een voorwaarde waaraan op zeer natuurlijke wijze kan worden voldaan, aangezien men bij een meercylindermotor de reeks zuigers toch niet in fase zal laten bewegen.

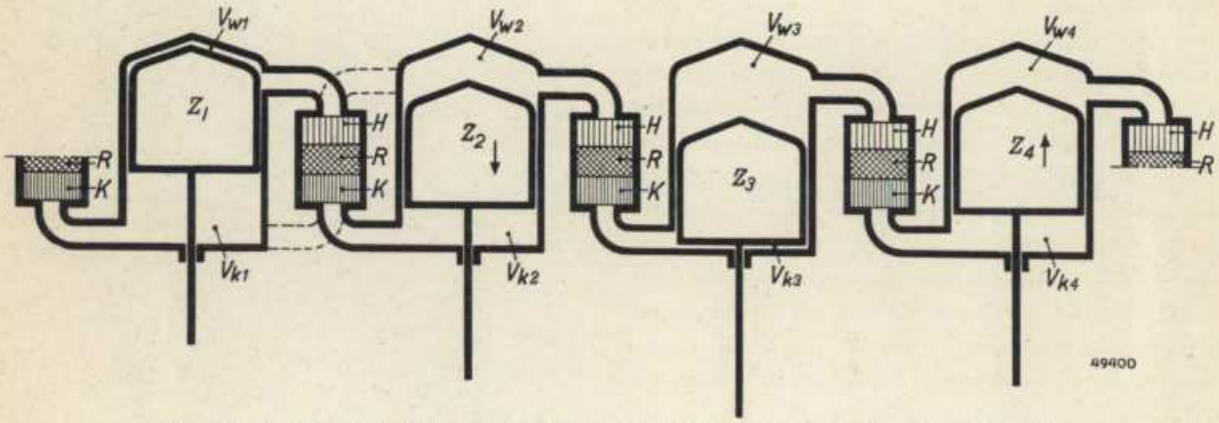



Fig. 9. Principe van de Philips meercylinder-heeteluchtmotor. In elk der vier geteekende cylinders bevindt zich bovenaan een warme ruimte, $V_{w1}$ tot $V_{w4}$, onderaan een koude ruimte, $V_{k1}$ tot $V_{k4}$. De warme ruimte van een cylinder is via een verhitter $H$, regenerator $R$ en koeler $K$ verbonden met de koude ruimte van de volgende cylinder. De zuigers $Z_1$-$Z_4$ der opeenvolgende cylinders bewegen met een geschikt gekozen faseverschil (in het geteekende geval met vier cylinders: 90°).

Hetgeen hier voor één paar zuigers en het hiertusschen besloten systeem is gezegd, geldt ook voor de rest. Laten wij dus ieder der vier zuigers in fig. 9 bij de voorafgaande vóór loopen, dan werkt elk der vier systemen als heeteluchtmotor.

*Door deze eenvoudige combinatie der systemen komen de verdringers met hun aandrijving te vervallen.* Het behoeft geen betoog dat dit een zeer belangrijke mechanische vereenvoudiging beteekent en een aanzienlijke verhooging van het mechanisch nuttig effect mogelijk maakt.

Wat de faseverschillen der zuigers betreft, ligt het bij vier zuigers voor de hand, deze met telkens 90° faseverschuiving te laten bewegen. Ook de variaties van bij elkaar behoorende warme en koude ruimten verschillen dan 90° in fase. Men kan ook meer dan vier systemen combineeren en komt dan tot andere faseverschillen. Binnen zekere grenzen ondervindt het rendement van de motor hiervan weinig invloed, aangezien de kromme die het rendement van het heeteluchtproces als functie van het faseverschil tusschen warme en koude ruimte weergeeft, in de buurt van het maximum een tamelijk vlak verloop heeft.

Bij de in fig. 9 geteekende wijze van verbinden der warme en koude ruimten moest, zooals wij hebben gezien, elke zuiger vóór loopen bij de voorafgaande. Deze volgorde van de zuigerbewegingen bepaalt de draairichting van de motor. Verwisselen wij de verbindingen tusschen de cylinders, in dier voege dat nu elke warme ruimte met de koude ruimte van de vorige cylinder wordt verbonden (in fig. 9 is dit schematisch voor één cylinderpaar door stippellijnen aangegeven), dan werkt elk systeem wederom als heeteluchtmotor, mits de volgorde der zuigerbewegingen juist omgekeerd is. Dit beteekent, dat de motor nu in tegengestelde richting loopt. *Men heeft hier derhalve een zeer eenvoudige methode om de draairichting van de motor tijdens het bedrijf om te keeren.* De omwisseling der verbindingen tusschen de cylinders wordt verwezenlijkt met behulp van een schuif voor elke cylinder, die aan de koude zijde van de motor (zie hieronder) kan worden aangebracht.

Belangrijk is vervolgens, dat bij de meercylindermotor elke zuiger dubbelwerkend is. Voor een goed begrip beschouwe men eerst bijv. fig. 7. De zuiger is daar, zooals bij alle tot nu toe beschouwde motoren, enkelwerkend, want hij brengt alleen gedurende de neergaande slag energie van het arbeidsmedium op de krukas over, terwijl bij de opgaande slag arbeid op het medium wordt verricht. De eerstgenoemde arbeid is grooter dan de laatstgenoemde, het verschil is de gewonnen mechanische energie. Maar de wrijvingsverliezen staan in een bepaalde verhouding tot de totale energie-omzet in het drijfwerk, onverschillig of de diverse energieposten voor

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



den gebruiker positief of negatief tellen. Nu in tegenstelling hiermee fig. 9: elke zuiger brengt zoowel bij zijn opgaande als bij zijn neergaande slag energie van het arbeidsmedium op de motor-as over. Elke zuiger bevindt zich nl. tusschen twee systemen, die we gemakshalve even het linker en het rechter systeem noemen. De opwaartsche slag van de zuiger valt voor een groot deel samen met de expansie van het linker systeem en met de compressie van het rechter systeem; omgekeerd staat de neergaande slag grootendeels in het teeken van expansie van het rechter en compressie van het linker systeem. In beide gevallen is het dus zoo, dat de compressie in het eene systeem voor een groot deel rechtstreeks door het expandeerende medium in het naburige systeem wordt bewerkstelligd, alleen via het zuigerlichaam; het drijfwerk wordt hierin niet gemoeid, het draagt slechts het overschot aan arbeid over, dat elke expansie levert. De energie-omzet in het drijfwerk is dus niet grooter dan juist aan het vermogen van de motor beantwoordt, en dienovereenkomstig blijven ook de wrijvingsverliezen beperkt.

Deze globale beschouwing dient nog op twee punten te worden gecorrigeerd. Ten eerste voor het feit, dat bij elke zuiger in fig. 9 de expansie van het linker en de compressie van het rechter systeem slechts „grootendeels" in de opwaartsche slag vallen (en omgekeerd). Ten tweede omdat wij bij de energie-omzet in het drijfwerk nog in rekening moeten brengen een „wattlooze component", nl. de versnellingskrachten der bewegende massa's van zuiger, zuigerstang enz. Wij beschouwen hiervoor het stangkrachten-diagram, *fig. 10*. Kromme *a* geeft het verloop van de „gaskracht", d.i. de kracht die het arbeidsmedium (van beide aangrenzende systemen tezamen) op elke zuigerstang uitoefent, als functie van de omwentelingshoek der motor-as, voor een bepaalde viercylindermotor. Een naar beneden gerichte kracht is hier positief uitgezet; de abscis 0° behoort bij de onderste zuigerstand; de linkerhelft van het diagram correspondeert dus met de opwaartsche slag en een positieve gaskracht verricht hier een negatieve arbeid op de motor-as, terwijl een negatieve kracht een positieve arbeid levert. In de rechterhelft is het omgekeerd. Aldus zijn de ingeschreven + en — teekens, die betrekking hebben op de arbeid verricht op de as, te begrijpen. Men ziet, dat de gaskrachten wel degelijk, gedurende twee tijdvakken per omwenteling, arbeid van de zuigerstang vragen. Het blijkt echter, dat deze nu juist voor het grootste deel door de „wattlooze" versnellingskrachten geleverd kan worden; zie kromme *b* en de resulteerende stangkracht kromme *c* in fig. 10. Natuurlijk is hiermee geen energie gewonnen, want een overeenkomstig energiebedrag verbruiken de versnellingskrachten weer in de rest van de periode. Maar de zuiger is nu, zooals kromme *c* laat zien, vrijwel zuiver dubbelwerkend geworden, zoodat onze oorspronkelijke conclusie van kracht blijft.

Door de relatief kleine stangkrachten steekt de meercylinder-heeteluchtmotor gunstig af bij een verbrandingsmotor, met hetzelfde vermogen per cylinder, hetzelfde cylindervolume en hetzelfde toerental. In fig. 10, die betrekking heeft op een

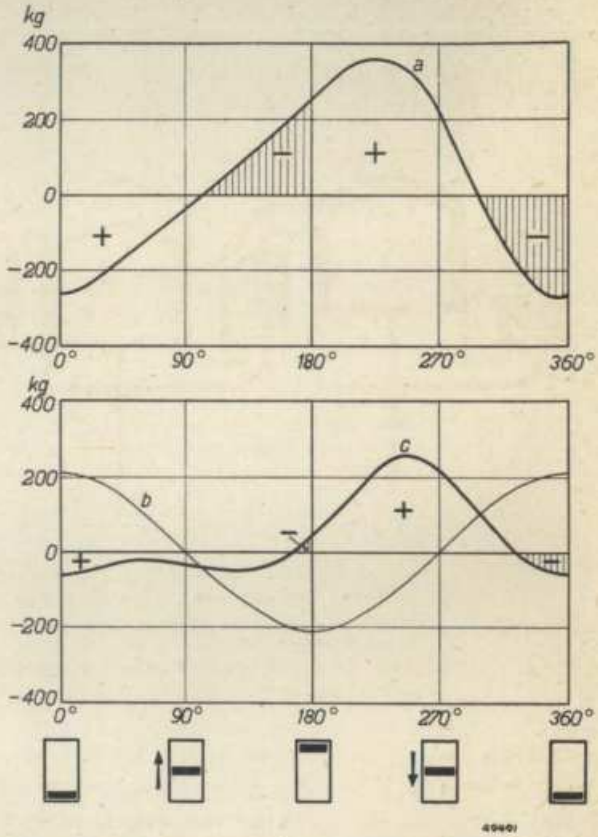


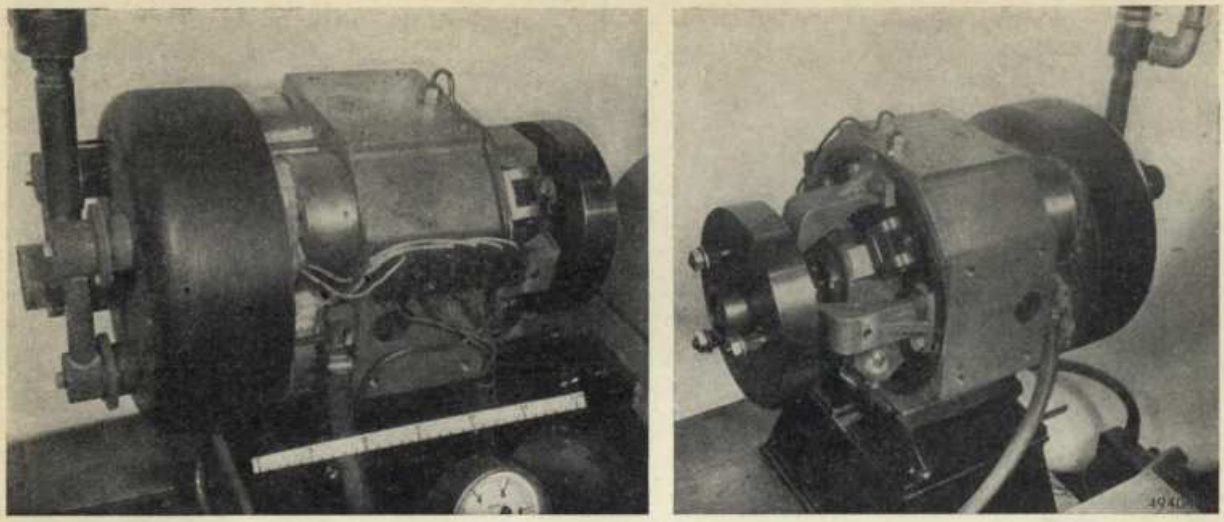

Fig. 10. Stangkrachten-diagram voor een bepaalde 20 PK viercylinder-heeteluchtmotor, met 3000 omw/min, bij vollast. De stangkracht (in kg) van de zuigerstang van een cylinder is uitgezet als functie van de omwentelingshoek der motor-as. De linkerhelft (0-180°) correspondeert met de opwaartsche zuigerslag, de rechterhelft met de neergaande slag. Naar beneden gerichte krachten zijn positief gerekend; + en — geven aan, dat de zuiger in de betrokken tijdvakken positieve dan wel negatieve arbeid aan de krukas levert. Kromme *a* = gaskracht, *b* = versnellingskracht, *c* = resulteerende stangkracht. Uit *c* blijkt, dat elke zuiger bij deze viercylindermotor vrijwel zuiver dubbelwerkend is.

heeteluchtmotor met 5 PK per cylinder en 3000 omw/min, is de topwaarde der resulteerende stangkracht ca 250 kg. Bij een vergelijkbare motor met inwendige verbranding treedt daarentegen een maximale stangkracht van ca 1200 kg op. De kleinere stangkrachten bij de heeteluchtmotor voeren tot een geringere belasting der lagers, hetgeen voor de constructie van groot belang is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023





*a* *b*

Fig. 11. Foto's van een uitvoeringsvoorbeeld van de Philips meercylinder-heeteluchtmotor: viercylindermotor, met evenwijdig in een vierkant geplaatste cylinders, met een tuimelschijf-mechanisme voor het overbrengen van de beweging der vier zuigers op de motor-as. De motor kan 15 PK leveren, bij 3000 omw/min. Het afgebeelde proefmodel wordt met gas als brandstof bedreven.

*a*) Op deze foto bevindt zich links de warme, rechts de koude zijde van de motor. De brandstof wordt door de pijp geheel links toegevoerd. In de kap aan de linkerzijde is de vóórverhitter ondergebracht. Van drie cylinders is een deel der ommanteling te zien. Geheel rechts het tuimelschijf-mechanisme en het vliegwiel. Bij dit mechanisme ligt de motor-as evenwijdig aan de assen der cylinders. Het drijfwerk bevindt zich in een gesloten huis, waarvan hier terwille van de duidelijkheid het deksel is afgenomen. De op het klemmenbordje in het midden aangesloten snoeren zijn de verbindingen naar een aantal, op verschillende punten in de motor aangebrachte, thermo-elementen, waarmee bij dit model contrôlemetingen werden verricht. (De erbij geteekende schaal geeft centimeters aan.)

*b*) Dezelfde motor, van de andere kant gezien. Men ziet hier iets meer van het tuimelschijf-mechanisme, tusschen het vliegwiel en het motorblok. Men lette op de compacte constructie die met d't mechanisme verkregen wordt.

Wat de constructieve uitvoering van de meercylindermotor betreft, konden vele bij de ééncylindermotor beschreven constructie-elementen hier in vrijwel ongewijzigde vorm in toepassing worden gebracht, zooals bijv. de in ringvorm om elke cylinder gelegde verhitter, regenerator en koeler, de isolatiedoppen op de zuigers die dienen om de loopvlakken koud te houden, de voorverhitter, enz. Een nieuw probleem echter was de plaatsing der verschillende cylinders en de overbrenging van alle zuigerkrachten op één as. Hierover willen wij in dit artikel slechts enkele opmerkingen maken.

Men zal de cylinders bij voorkeur zoo plaatsen dat alle koude ruimten aan één kant van de motor komen te liggen. Aan deze koude zijde wordt het geheele drijfwerk enz. ondergebracht. In het schema fig. 9 is reeds een dergelijke opstelling ondersteld.

In dit schema zijn verder de vier cylinders op een rij geplaatst. Deze opstelling heeft het bezwaar, dat er een lang verbindingskanaal noodig is tusschen de laatste en de eerste cylinder, hetgeen verliezen meebrengt. Om dit te ondervangen, kan men de vier cylinders in een ster opstellen zooals bij vliegtuigmotoren gebruikelijk is (de koude zijde legt men dan in het midden van de ster), of in twee achter elkaar geplaatste V's, zooals bij sommige automobielmotoren wordt gedaan. Weer een andere mogelijkheid bestaat hierin, de vier cylinders evenwijdig (als het ware in een bundel) in een vierkant te plaatsen. Terwijl bij de eerstgenoemde twee opstellingen het omzetten van de rechtlijnige beweging der zuigers in de draaiende beweging van de motor-as geschieden kan door een krukas-constructie, is in het laatstgenoemde geval het gebruik van een zg. tuimelschijf-mechanisme aangewezen. De in *fig. 11* als een uitvoeringsvoorbeeld van de Philips meercylinder-heeteluchtmotor weergegeven motor is op deze laatste wijze geconstrueerd. Deze uitvoeringsvorm beschouwen wij echter slechts als geschikt voor heeteluchtmotoren tot eenige tientallen PK. Voor grootere vermogens zijn door ons andere drijfwerkconstructies uitgewerkt, gebaseerd op de zoojuist genoemde opstelling der cylinders in twee achter elkaar geplaatste V's.

Het zou ons in dit artikel te ver voeren op de, in hoofdzaak mechanische, bijzonderheden van deze verschillende uitvoeringsvormen en de motiveering van hun keuze in te gaan. Dit blijft aan verdere artikelen in dit tijdschrift voorbehouden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



# SPANNINGSSTOOTEN IN GELIJKRICHTERS

door Tj. DOUMA. 621.314.65.015.33

De ventielen in een gelijkrichter kan men opvatten als schakelaars die op bepaalde oogenblikken stroomketens sluiten of openen. Hierbij ontstaan in het algemeen overgangsverschijnselen, die zich o.a. uiten in spanningsstooten op zelfinducties welke in de ketens voorkomen; bij gebruik van ventielen met regelbaar ontsteekmoment zijn deze pieken bijzonder hoog, als men, door vertraging van het ontsteekmoment, de gelijkspanning min of meer omlaag geregeld heeft. Door de aanwezigheid van parasitaire capaciteiten worden trillingskringen gevormd en bovendien de spanningspieken geconcentreerd op de uiterste windingen van de transformator- en eventueele andere spoelen. In gelijkrichters voor hooge spanningen, zooals voor groote zenders worden gebruikt, levert dit een gevaar voor de isolatie op. Verschillende methoden worden aangegeven om dit gevaar te bestrijden, zooals het aanbrengen van anodesmoorspoelen en van condensatoren met dempweerstanden.

## Inleiding

Wanneer in een electrisch netwerk waarin stroomen vloeien, plotseling verandering wordt gebracht — bijv. door het kortsluiten of openen van een tak van het netwerk —, dan zal op den duur een stationnaire toestand der stroomen en spanningen intreden die in het algemeen verschilt van de toestand welke heerschte onmiddellijk voordat de verandering tot stand kwam. Het verschil dat van het schakelmoment af bestaat tusschen deze eindtoestand en de werkelijke toestand, noemt men het overgangsverschijnsel. Ten gevolge van de energiedissipatie sterft het geleidelijk uit en vormt aldus een overbrugging tusschen de oude en de nieuwe toestand.

Niet alleen het in- of uitzetten van schakelaars heeft deze overgangsverschijnselen ten gevolge; in gelijkrichters bijv. treden zij tijdens het normale bedrijf voortdurend op. Dit wordt onmiddellijk duidelijk als men bedenkt dat een electrisch ventiel groote overeenkomst met een schakelaar vertoont: zoolang de anode negatief ten opzichte van de kathode is, laat het ventiel geen (of althans een meestal verwaarloosbare) stroom door en komt het dus overeen met een geopende schakelaar; laat het ventiel stroom (in de goede richting) door, dan gebeurt dit met een spanningsverlies dat — hoewel grooter dan bij een normale schakelaar — toch veelal klein is ten opzichte van de bedrijfsspanning, zoodat het ventiel in deze toestand zich als een gesloten schakelaar gedraagt. De ventielen in een gelijkrichter gaan tijdens het werken hiervan op bepaalde oogenblikken „open" en „dicht", hetgeen telkens tot een overgangsverschijnsel aanleiding kan geven. Niet alleen zijn deze overgangsverschijnselen mede van invloed op de oogenblikken waarop de ventielen stroomloos worden (en daardoor op het algemeene beeld van de werking van de gelijkrichter), doch op de bedoelde oogenblikken treden in bepaalde gevallen spanningsstooten met een steil front en een groote amplitude op, die een ernstig gevaar kunnen beteekenen voor de isolatie van de transformator- of smoorspoelen die deel van de gelijkrichter uitmaken. In het bijzonder treden dergelijke verschijnselen op, als men het (elke periode der netfrequentie terugkeerende) oogenblik waarop de ventielen stroom gaan doorlaten — het zg. ontsteekmoment — kunstmatig vertraagd heeft ten opzichte van het vroegst mogelijke ontsteekmoment, teneinde de verkregen gelijkspanning te verlagen. Dit kan geschieden door als ventielen relaisbuizen te gebruiken, bijv. gelijkrichtbuizen met gasvulling en stuurroosters, aan welke laatste men een wisselspanning toevoert die in fase achter is bij de anodewisselspanning, of wel kwikkathodebuizen met bijv. een capacitieve ontsteker, waaraan men op de gewenschte oogenblikken ontsteekimpulsen toevoert [1]).

In gelijkrichters heeft men niet alleen te maken met de zooeven genoemde, regelmatig voorkomende overgangsverschijnselen, die een gevolg zijn van het periodieke open- en dichtgaan der ventielen, doch uiteraard eveneens met overgangsverschijnselen veroorzaakt door „gewone" schakelmanipulaties, dwz. het in- of uitschakelen. Deze overgangsverschijnselen blijven echter in het onderstaande buiten beschouwing.

De spanningsstooten, waarvan hierboven sprake was, worden opgewekt in de zelfinductie van de gelijkrichter. In de gelijkrichters die wij hier voornamelijk op het oog hebben — die voor de anodespanning van zenders — is gewoonlijk op twee

[1]) Een gelijkrichter, voorzien van relaisbuizen met een gloeikathode en een stuurrooster is beschreven in Philips techn. T. 1, 161-165, 1936. Over de werking van relaisbuizen met een kwikkathode en een capacitieve ontsteker is een artikel verschenen in Philips techn. T. 9, 105-113, 1947 (no. 4).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



plaatsen zelfinductie aanwezig, nl. in de smoorspoel — welke dient om de „rimpel" van de gelijkgerichte stroom te verminderen — en als spreidingszelfinductie der transformatorspoelen, d.i. de zelfinductie die beantwoordt aan die magnetische krachtlijnen in de transformator welke slechts door een primaire of door een secundaire spoel (of een deel dezer spoelen) worden omvat.

Van groot belang zijn echter ook de capaciteiten der wikkelingen, en wel in twee opzichten: 1) zij beheerschen, althans op het oogenblik van ontstaan van de spanningsstoot, de verdeeling er van over de in serie geschakelde windingen; 2) in combinatie met de bovengenoemde zelfinducties vormen zij trillingskringen, die door het overgangsverschijnsel worden aangestooten.

In de volgende beschouwingen zullen wij de spanningsstooten nader onderzoeken en daarna middelen aangeven voor een doelmatige bestrijding er van. Wij gaan daartoe uit van een eenvoudige gelijkrichtschakeling, werkend op slechts één fase van de wisselspanning, om vervolgens tot de meer gebruikelijke schakelingen met meer fasen over te gaan; een en ander eerst zonder, dan met inachtneming van de invloed der capaciteiten.

## Gelijkrichter werkende op één fase van de wisselspanning

In de eenvoudige schakeling van *fig. 1* is de spreidingszelfinductie voorgesteld door de afzonderlijke zelfinductie $L_a$ in serie met de secundaire keten,

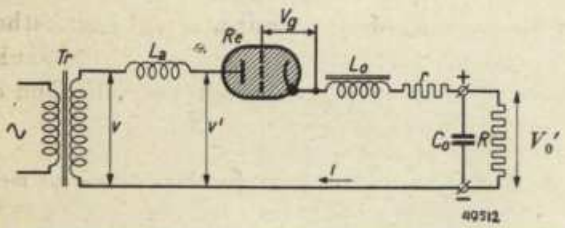



Fig. 1. Gelijkrichtschakeling, gevoed door een eenfasige wisselspanning. Bij voldoend groote capaciteit $C_0$ mag de rimpel van de spanning $V_0'$ aan de belastingsweerstand $R$ worden verwaarloosd. $Re$ = relaisbuis, waarvan het ontsteekmoment geregeld wordt door de fase van de roosterwisselspanning $v_g$; $L_0$ = zelfinductie van de smoorspoel; $L_a$ = spreidingszelfinductie van de transformator; $v = V_{max} \sin \omega t$ is de secundaire spanning bij nullast; $v'$ = klemspanning; $r$ = weerstand van de smoorspoel en de transformator.

die overigens bevat: de secundaire transformatorspoel, waarin bij nullast de wisselspanning $v = V_{max} \sin \omega t$ wordt geïnduceerd, het ventiel $Re$ (met gasvulling en een stuurrooster; een relaisbuis dus), een smoorspoel met de zelfinductie $L_0$, een weerstand $r$, en de parallelschakeling van de belastingsweerstand $R$ en de condensator $C_0$. Het doel van deze laatste is, de spanningsrimpel aan de klemmen van $R$ te verminderen. Om de zaak niet noodeloos te compliceeren, zullen wij aannemen dat deze rimpel verwaarloosbaar klein is.

Voor een relatief kleine rimpelspanning geldt dat de amplitude er van ca $p\%$ of minder ($p < 100$) van de gelijkspanning bedraagt, als $C_0$ en $R$ voldoen aan

$$\omega C_0 R \geqq 100\, \pi/p.$$

Bij de later te bespreken gelijkrichters met $m$ fasen luidt deze voorwaarde:

$$\omega C_0 R \geqq 100\, \pi/mp.$$

Er zal door de keten een pulseerende stroom $i$ vloeien. De stroomimpuls vangt aan op een oogenblik $t_o$, dat men — bijv. door regeling van de fase der roosterspanning $v_g$ — tusschen bepaalde grenzen kan instellen; hij eindigt op een tijdstip $t_d$, dat wij aanstonds nader zullen bepalen. Op deze beide oogenblikken vertoont de stroomkromme een knik en zal dus de spanning aan de zelfinducties $L_a$ en $L_0$ een plotselinge verandering ondergaan ter grootte van $L_a di/dt$ resp. $L_0 di/dt$, met $di/dt$ geldende voor de oogenblikken $t = t_o$ en $t = t_d$. Om deze spanningssprongen te berekenen, beschouwen wij de differentiaalvergelijking van de keten:

$$L_a \frac{di}{dt} + v_{arc} + L_0 \frac{di}{dt} + ri + V_0' = v = V_{max} \sin \omega t.$$

Hierin is $V_0'$ de constant onderstelde condensatorspanning en $v_{arc}$ de oogenblikswaarde van de boogspanning van de relaisbuis. Met goede benadering mag deze als onafhankelijk van de stroom, dus als een gelijkspanning, beschouwd worden. Vatten we haar en de condensatorspanning samen tot één gelijkspanning $V_0 = v_{arc} + V_0'$, evenzoo de beide zelfinducties tot één zelfinductie $L = L_a + L_0$, en schrijven we voorts $\tau$ voor $\omega t$, dan gaat de vergelijking over in

$$\omega L \frac{di}{d\tau} + ri = V_{max} \sin \tau - V_0. \quad . \quad . \quad (1)$$

Bij het oogenblik $t_o$ waarop de stroom begint te vloeien — doordat dan de roosterspanning van de relaisbuis de critische waarde overschrijdt — behoort de „ontsteekhoek" $\omega t_o = \tau_o$. De klemspanning $v'$ van de secundaire transformatorspoel heeft op dat moment de waarde

$$(v')_{t_o} = V_{max} \sin \tau_o - (L_a \frac{di}{dt})_{t_o} =$$

$$= V_{max} \sin \tau_o - \frac{L_a}{L} (\omega L \frac{di}{d\tau})_{\tau_o}.$$

Op het oogenblik van ontsteken treedt er dus een

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



sprong in de klemspanning op ter grootte van

$$(\Delta v)_o = \frac{L_a}{L}\,(\omega L\,\frac{di}{d\tau})_{\tau_o}.$$

Substitueeren wij hierin de waarde van $\omega L\ di/d\tau$ uit (1), en bedenken we dat ten tijde $t = t_o$ de stroom $i = 0$ is, dan vinden we:

$$(\Delta v)_o = \frac{L_a}{L}\,(\sin\tau_o - \frac{V_0}{V_{max}})\cdot V_{max} =$$

$$= \frac{L_a}{L_0 + L_a}\cdot(\sin\tau_o - q)\cdot V_{max}, \quad . \quad . \quad (2)$$

als $q$ de spanningsverhouding $V_0/V_{max}$ voorstelt. In *fig. 2*, het oscillogram van de secundaire transformatorspanning in een nog verder vereenvoudigde schakeling, is de sprong goed te zien.

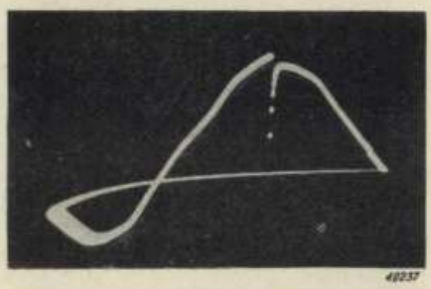


Fig. 2. Oscillogram van de secundaire klemspanning $v'$ in een gelijkrichter volgens de schakeling van fig. 1 met $L_0 = 0$, $C_0 = 0$, ontsteekhoek $\tau_o$ = ca 90°. Aan de spreidingszelfinductie $L_a$ ontstaat bij het ontsteken een spanningsstoot.

Er treedt opnieuw een knik in de stroomkromme op, als $i$ nul wordt, dus als het ventiel dooft ($t = t_d$, waarbij behoort: $\omega t_d = \tau_d =$ de „doofhoek"). Men vindt dan voor de sprong in de klemspanning:

$$(\Delta v)_d = \frac{L_a}{L_0 + L_a}\cdot(\sin\tau_d - q)\cdot V_{max}. \quad . \quad (3)$$

Dat in fig. 2 niets van deze sprong te zien is, is een gevolg van het feit dat dit oscillogram is opgenomen onder omstandigheden waarbij $q \approx 0$, $\tau_d \approx 180°$ was, zoodat $(\Delta v)_d$ zeer klein was.

Aan de zelfinductie $L_0$ treden analoge sprongen op, gegeven door de uitdrukkingen die men verkrijgt door in de teller van (2) en (3) $L_a$ door $L_0$ te vervangen.

Wat nu de grootte van deze sprongen betreft, uit verg. (2) en (3) ziet men in de eerste plaats dat de beide zelfinducties, $L_a$ en $L_0$, als spanningsdeeler fungeeren, en voorts dat de sprongen, voor een gegeven topwaarde $V_{max}$ der wisselspanning, het grootst zijn, als $q$ zoo klein mogelijk, dus de condensatorspanning nul is (wat zich voordoet bij kortsluiting, $R = 0$). Bovendien is de sprong bij het ontsteken groot, als de ontsteking geschiedt op het oogenblik waarop de wisselspanning haar topwaarde bereikt ($\sin\tau_o = 1$).

Om dit nauwkeuriger na te gaan, dienen wij de in (2) en (3) voorkomende grootheden $q$ en $\tau_d$, die in het algemeen functies zijn van $\tau_o$, $R$, $r$, $L$ en $\omega$, nader te beschouwen. Hierbij is de weerstand $r$, die in practische gevallen slechts uit de weerstand van de transformator, van de smoorspoel en van de leidingen bestaat, doorgaans van weinig beteekenis. Verwaarloozen wij deze weerstand, dan blijkt het dat $\tau_d$ en $q$ als functie van twee variabelen, $\tau_o$ en $\varphi$, kunnen worden geschreven, waarbij $\varphi$ is gedefinieerd door $\operatorname{tg}\varphi = \omega L/R$. De gang van deze berekening is in het kort als volgt.

Voor $r = 0$ gaat (1) over in

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{V_{max}}{\omega L}\,(\sin\tau - q), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

waarbij behooren de grensvoorwaarden

$$i = 0 \text{ voor } \tau = \tau_o \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

en

$$i = 0 \text{ voor } \tau = \tau_d \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Men kan (4) gemakkelijk integreeren en de daarbij optredende integratieconstante met behulp van (5) bepalen. Maakt men nu gebruik van (6), dan vindt men een betrekking tusschen $\tau_o$, $\tau_d$ en $q$. Een tweede vergelijking tusschen deze grootheden volgt uit de voorwaarde dat aan de condensator $C_0$ per periode evenveel lading wordt toegevoerd als onttrokken. Deze hoeveelheden lading bedragen resp.

$$\int_{t_o}^{t_d} i\,dt \quad \text{en} \quad \frac{V_0'}{R}\,T,$$

als $T$ de duur van een periode is. Dus

$$\int_{\tau_o}^{\tau_d} i\,d\tau = 2\pi\,\frac{V_0'}{R} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Substitueert men hierin de uit (4) en (5) gevonden uitdrukking voor $i$, dan ontstaat een tweede relatie tusschen $\tau_o$, $\tau_d$ en $q$, waaruit men, in combinatie met de reeds gevondene, $\tau_d$ en $q$ afzonderlijk als functie van $\tau_o$ kan berekenen; $\varphi$ treedt hierbij op als parameter.

Gaat men op de zoojuist geschetste wijze te werk, dan vindt men uit (4) en (5):

$$i = \frac{V_{max}}{\omega L}\,\{\cos\tau_o - \cos\tau - q\,(\tau - \tau_o)\}. \quad . \quad . \quad (8)$$

Uit (6) en (8) volgt:

$$0 = \cos\tau_o - \cos\tau_d - q\,(\tau_d - \tau_o). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Voeren we nu twee hulphoeken, $x$ en $y$, in:

$$x = {}^1/_2(\tau_d - \tau_o), \quad y = {}^1/_2(\tau_d + \tau_o), \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

dan kunnen we (9) in deze vorm schrijven:

$$q = \frac{\sin x}{x} \sin y. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Verwaarloost men de boogspanning ten opzichte van de gelijkspanning $V_0'$, dwz. ziet men af van het verschil tusschen $V_0'$ en $V_0$, dan leidt substitutie van (8) in (7), in combinatie met (10), tot

$$\operatorname{tg} y = \frac{\operatorname{cotg} \varphi}{\pi} \cdot x \cdot (x \operatorname{cotg} x - 1). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Voor verschillende waarden van de parameter $\varphi$ levert (12) bij elkaar behoorende waarden van $x$ en $y$, dus van $\tau_o$ en $\tau_d$. Uit (11) volgen ten slotte de bijbehoorende waarden van $q$.

Het resultaat: $\tau_d = f(\tau_o)$ en $q = f(\tau_o)$, met $\varphi$ als parameter, is voorgesteld in *fig. 3* resp. *fig. 4*. Uit $q$ volgt onmiddellijk de gelijkspanning: $V_0' = qV_{max} - v_{arc}$. Daar de boogspanning meestal klein ten opzichte van de gelijkspanning is, kan men de krommen van fig. 4 als de zg. regelkarakteristieken beschouwen, die het verloop van de gelijkspanning als functie van de ontsteekhoek weergeven.

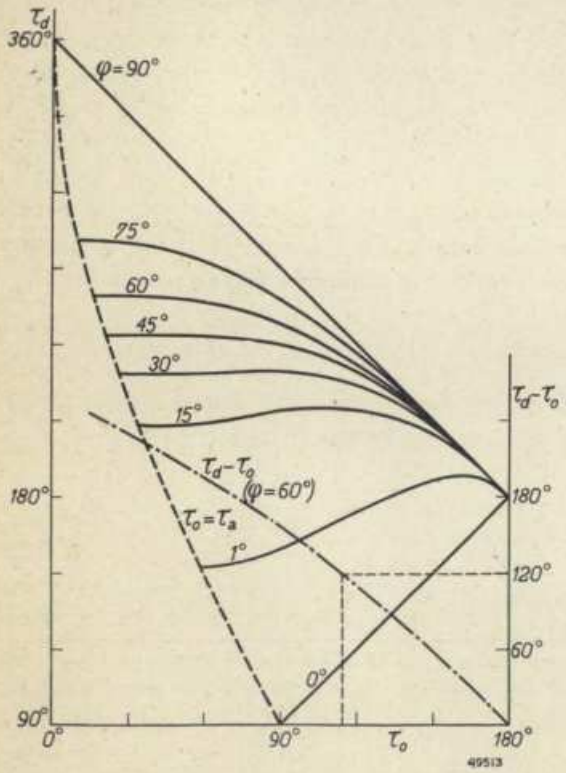



Fig. 3. Getrokken krommen: doofhoek $\tau_d$ als functie van de ontsteekhoek $\tau_o$. Parameter $\varphi = \text{arc}_1 \operatorname{tg} \omega L/R = 0\text{-}90°$ (de index 1 bij arc geeft aan dat een hoek in het eerste kwadrant wordt bedoeld). Stippellijn waarop de krommen eindigen: meetkundige plaats waarvoor $\tau_o = \tau_a$ ($\tau_a$ is de hoek waarbij de anode van de relaisbuis positief wordt). Het gebied links van de stippellijn correspondeert met toestanden waarbij de anode negatief is en de buis dus niet kan ontsteken. Punt-streep-lijn: duur van de stroomimpuls, $\tau_d - \tau_o$, voor $\varphi = 60°$.

Een ventiel kan alleen ontsteken als de anode positief is ten opzichte van de kathode. Is het ventiel een relaisbuis met een stuurrooster, dan moet voor het ontsteken nog aan een tweede voorwaarde zijn voldaan: de roosterspanning moet nl. boven een zekere critische waarde liggen, welke in het algemeen een functie van de oogenblikswaarde der anodespanning

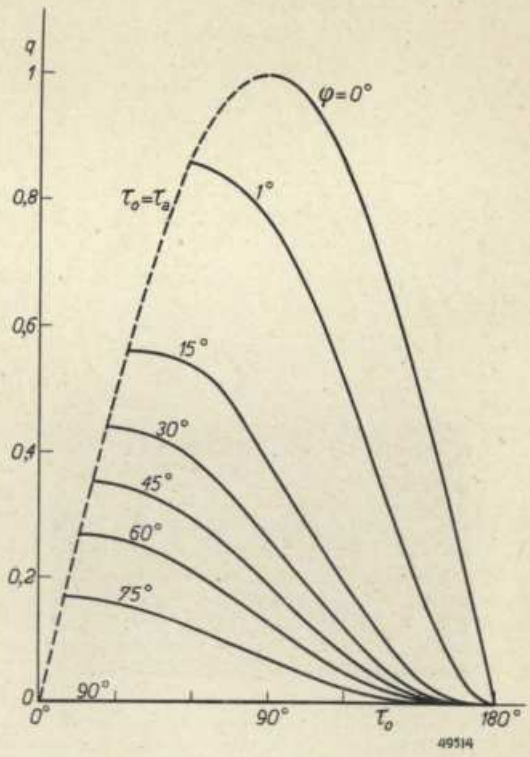



Fig. 4. Verhouding $q$ (ongeveer gelijk aan de verkregen gelijkspanning $V_0'$, gedeeld door de topwaarde $V_{max}$ der wisselspanning) als functie van $\tau_o$, met $\varphi$ als parameter. De stippellijn komt weer met de vroegst mogelijke ontsteking overeen ($\tau_o = \tau_a$).

is en waarvan het alleen zin heeft te spreken bij positieve waarden der anodespanning. Nu wordt deze laatste pas positief op het oogenblik $t_a$ waarop de transformatorspanning de gelijkspanning aan de condensator overschrijdt, dus bij een hoek $\omega t_a = \tau_a$ in het eerste kwadrant, waarvoor geldt: $V_{max} \sin \tau_a = V_0'$, of $\sin \tau_a = V_0'/V_{max}$, wat ongeveer gelijk aan $q$ is, als $v_{arc} \ll V_0'$. Vroeger dan overeenkomt met $\tau_a$ kan de buis niet worden ontstoken. Vandaar dat de krommen in fig. 3 en 4 aan de linkerzijde eindigen op de gestippelde grenskrommen, die gedefinieerd zijn door $\tau_o = \tau_a$; in fig. 4 is deze grenskromme een deel van een sinuslijn.

De factoren $(\sin \tau_o - q)$ en $(\sin \tau_d - q)$, die in (2) resp. (3) voorkomen, kunnen nu met behulp van fig. 3 en 4 als functie van $\tau_o$ worden berekend, met $\varphi$ als parameter. Zoodoende vindt men de krommen van *fig. 5* en *fig. 6*. De grootte van de spanningsstooten bij het ontsteken en het dooven verkrijgt men door de uit fig. 5 resp. 6 afgelezen waarden te vermenigvuldigen met een factor $V_{max}L_a/(L_0+L_a)$ resp. $V_{max}L_0/(L_0+L_a)$, al naar gelang het de transformator- of de smoorspoel betreft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Uit fig. 5 ziet men nu dat de ontsteekstooten groot zijn, als in een sterk inductieve keten ($\varphi \approx 45°$-$90°$) de ontsteking ongeveer bij de top van de wisselspanning geschiedt ($\tau_o \approx 90°$). De factor $\sin(\tau_o - q)$ is maximaal 1, welke waarde optreedt bij $\varphi = 90°$, $\tau_o = 90°$.

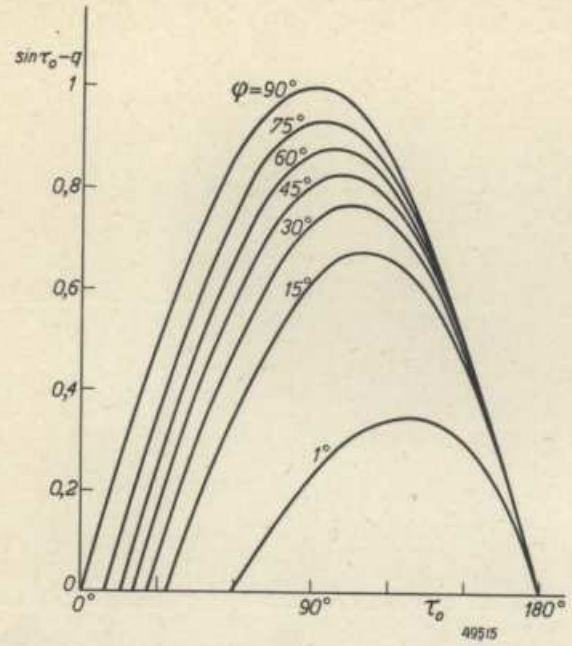



Fig. 5. Factor $(\sin \tau_o - q)$ waarmee de spanningsstooten bij het ontsteken evenredig zijn, als functie van de ontsteekhoek $\tau_o$, met $\varphi$ als parameter. Groote waarden treden op bij $\varphi \approx 90°$ (sterk inductieve keten) en $\tau_o \approx 90°$ (ontsteking bij de top van de wisselspanning).

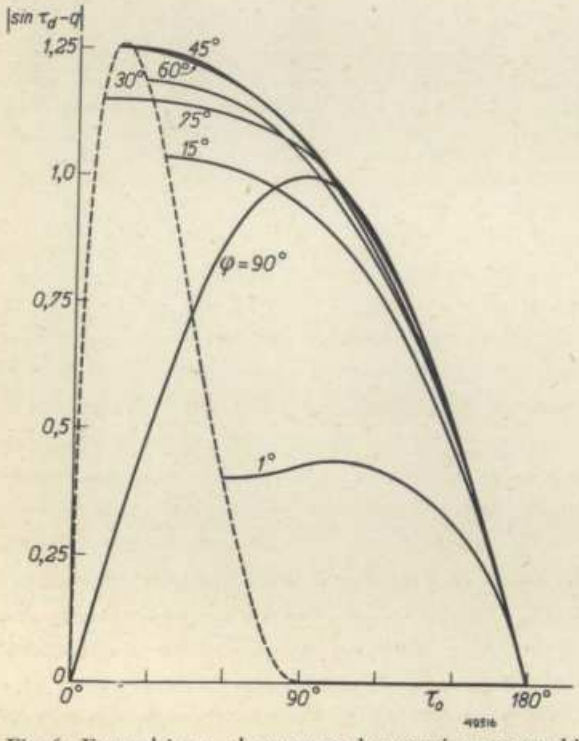
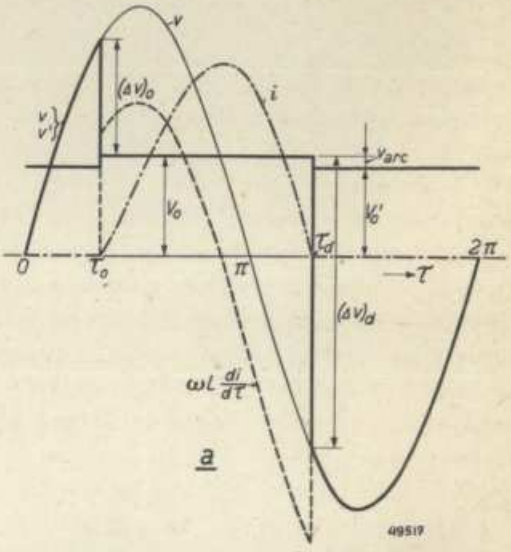



Fig. 6. Factor $|\sin \tau_d - q|$, waarmee de spanningsstooten bij het dooven evenredig zijn, als functie van de ontsteekhoek $\tau_o$, met $\varphi$ als parameter. De krommen eindigen links op de gestippelde grenslijn, waarvoor (13) de vergelijking is; deze heeft een maximum van 1,26 bij $\tau_o = 18°$. De doofstooten zijn groot bij vele combinaties van $\varphi$ en $\tau_o$ waarbij $\varphi \approx 15°$-$90°$, $\tau_o \approx 15°$-$120°$.

In fig. 6 eindigen de krommen links op de gestippeld geteekende grenskromme, waarvan de vergelijking luidt [2]):

$$\cos \tau_d - \tau_d \cdot \sin \tau_a = \cos \tau_a - \tau_a \cdot \sin \tau_a. \quad (13)$$

De door (13) gegeven functie vertoont een maximum, ten bedrage van 1,26, bij $\tau_o = 18°$,



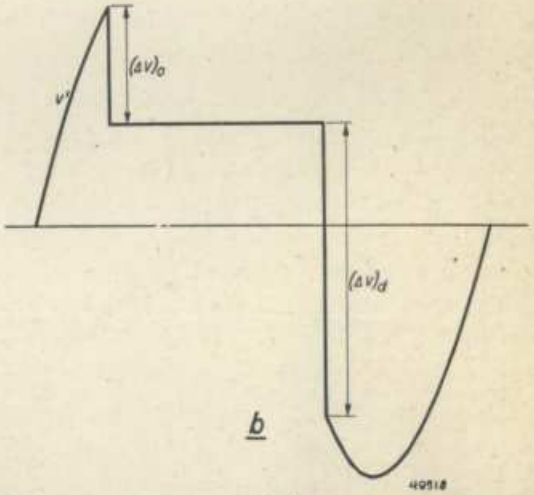




Fig. 7. Spanningen en stroom als functie van $\tau$, in een gelijkrichter volgens fig. 1, met $\varphi = 30°$, $\tau_o = 60°$, waarbij behooren volgens fig. 3: $\tau_d = 229°$, en volgens fig. 4: $q = 0{,}39$. *a*) Dunne sinuslijn: voedende wisselspanning $v$; punt-streep-kromme: stroom $i$; gestippelde kromme: spanning aan de zelfinductie, $\omega L\, di/d\tau$. Hier is aangenomen dat $L_0 = 0$ is, dus $L = L_a$. De klemspanning $v'$ (dikke lijn) is dan tijdens de stroomdoorgang ($\tau_o < \tau < \tau_d$) gelijk aan $v - \omega L\, di/d\tau = V_0 = V_0' + v_{arc}$; vóór en na de stroomdoorgang ($\tau < \tau_o$ resp. $\tau > \tau_d$) is $v' = v$. Bij $\tau = \tau_o$ treedt in de klemspanning een ontsteekstoot $(\Delta v)_o$ op, bij $\tau = \tau_d$ een doofstoot $(\Delta v)_d$.
*b*) Hier is het verloop van $v'$ afzonderlijk voorgesteld.

[2]) Dit volgt uit de tusschen $\tau_o$, $\tau_d$ en $q$ bestaande betrekking (9), toegepast op het grensgeval van zoo vroeg mogelijke ontsteking: $\tau_o = \tau_a = \text{arc}_1 \sin q$, waarin de index bij arc een hoek in het eerste kwadrant aanduidt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



$q = \sin 18° = 0{,}31$, waarbij behooren: $\tau_d = 252°$, $\varphi = 53°$. Voor deze combinatie zijn dus de bij het dooven optredende spanningssprongen het grootst. Bij vele combinaties uit ruime gebieden van $\varphi$ en $\tau_o$ echter: $\varphi \approx 15°\text{-}90°$, $\tau_o \approx 15°\text{-}120°$, zijn zij maar weinig kleiner dan dit maximum.

*Fig. 7* ten slotte laat het verloop der grootheden $v$, $v'$, $i$ en $\omega L\, di/d\tau$ als functie van $\tau$ zien, voor het geval $\varphi = 30°$, $\tau_o = 60°$. De beide spanningssprongen zijn hier goed te zien.

### Gelijkrichter werkend op een *m*-fasig systeem van wisselspanningen

De besproken schakeling (fig. 1) komt nauwelijks in aanmerking voor de voeding van zenders, o.a. omdat de sterke pulsatie van de gelijkgerichte stroom hooge waarden van de zelfinductie $L_0$ en de capaciteit $C_0$ noodig maakt om de rimpelspanning aan de uitgangsklemmen beneden het toelaatbare maximum te brengen. Steeds verkiest men in zulke gevallen een gelijkrichtschakeling die uit een symmetrisch meerfasig systeem wordt gevoed. Het aantal $m$ dezer fasen is gewoonlijk 2, 3, 4 of 6. Voor $m = 3$ is de schakeling in *fig. 8* aangegeven. De roosterwisselspanningen moeten eveneens een systeem van $m$ fasen vormen, met dezelfde volgorde der fasen als het systeem der anodespanningen.

*Vereenvoudigd geval: geen spreiding, en in de uitwendige keten alleen weerstand*

Het onderzoek van deze schakeling willen wij beginnen met het beschouwen van een sterk vereenvoudigd geval. Wij zullen nl. voorloopig onderstellen dat in de driefasige schakeling van fig. 8 de zelfinducties $L_a$ en $L_0$ en de capaciteit $C_0$ nul zijn, zoodat zich slechts weerstand $(R + r)$ in de uitwendige kring bevindt. De transformatorspanningen worden, ook bij belasting, sinusvormig ondersteld; de boogspanning wordt verwaarloosd.

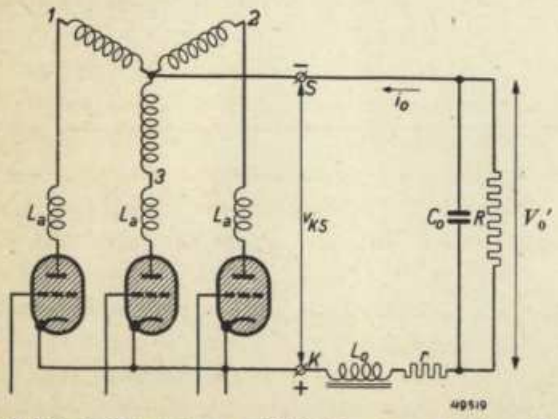



Fig. 8. Schakeling van een gelijkrichter, gevoed uit een driefasig systeem van wisselspanningen. $L_a$ = spreidingszelfinductie per tak.

Wij kiezen aanvankelijk het ontsteekmoment „laat", dwz. de ontsteekhoek $\tau_o$ weinig kleiner dan 180°, en gaan vervolgens na wat er gebeurt als de ontsteking geleidelijk wordt vervroegd.

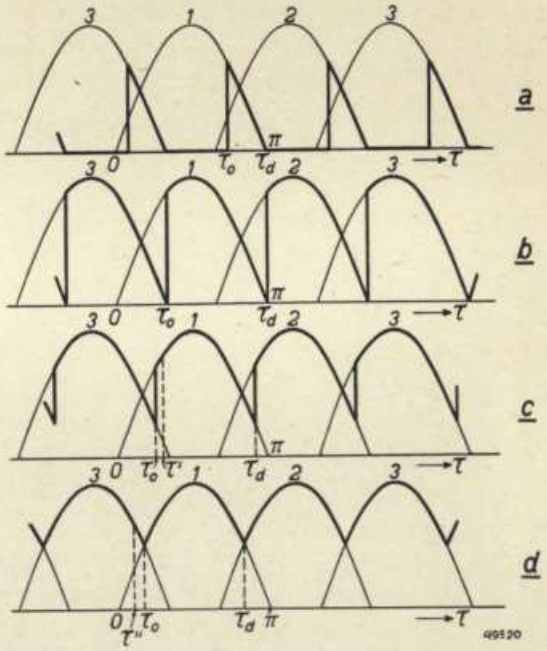



Fig. 9. Spanningen en stroomen als functie van $\tau$, voor een gelijkrichter volgens fig. 8, met $L_a = 0$, $L_0 = 0$, $C_0 = 0$. Dunne lijnen: positieve helften van de sinusvormige spanningen der spoelen *1*, *2* en *3*; dikke lijnen: spanning van $K$ ten opzichte van $S$, tevens stroom in de uitwendige keten. De ontsteekhoek $\tau_o$ wordt gevarieerd van 135° tot 30°.
*a*) $\tau_o = 135°$, de stroomimpuls duurt korter dan 1/3 periode, de stroom in de uitwendige keten vertoont onderbrekingen.
*b*) $\tau_o = 60°$, *c*) $\tau_o = 45°$, *d*) $\tau_o = 30°$: de stroomimpulsen nemen 1/3 periode in beslag, de stroom in de uitwendige keten vloeit zonder onderbrekingen. Het geval (*b*) is het grensgeval tusschen onderbroken en niet-onderbroken stroom. Bij (*d*) is de ontsteking zoo vroeg mogelijk, de verkregen gelijkspanning zoo groot mogelijk.

In *fig. 9* geven de dunne sinuslijnen het spanningsverloop der anoden ten opzichte van het sterpunt $S$ (de negatieve pool) aan. De dik geteekende krommen stellen het verloop van de spanning der kathoden $K$ (de positieve pool) ten opzichte van $S$ voor, en wel bij (*a*) voor $\tau_o = 135°$. Wegens de evenredigheid van deze spanning met de stroom die door de weerstanden $R$ en $r$ vloeit, zijn deze krommen tevens de grafische voorstelling van de genoemde stroom, welke, naar men ziet, uit drie impulsen per periode bestaat. Door elk der ventielen loopt een stroom, gevormd door slechts één zulk een impuls per periode.

Laten wij nu de ontsteking geleidelijk vroeger geschieden, dan wordt bij $\tau_o = 60°$ de in fig. 9*b* geschetste toestand bereikt, waarbij het stroomlooze interval tusschen de impulsen tot nul is ingekrompen, zoodat elk der impulsen een duur van juist 1/3 periode beslaat. Verkleint men $\tau_o$ verder

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



(fig. 9c), dan blijft de impulsduur op 1/3 periode gehandhaafd, hetgeen als volgt is in te zien. Na het ontsteken van een ventiel, bijv. dat in de tak *1*, is de spanning $v_1$ der bijbehoorende transformatorspoel grooter dan de spanning $v_3$ welke de in fase aan *1* voorafgaande spoel *3* levert (zie fig. 9c, bijv. bij $\tau'$). Daar de hoogere spanning $v_1$ ook tusschen de gelijkstroomklemmen $S$ en $K$ heerscht, is de anodespanning van het ventiel in tak *3*, $v_3-v_1$, negatief. Dit ventiel moet dus stroomloos zijn geworden zoodra dat in tak *1* werd ontstoken. In ieder ventiel van de gelijkrichter is de stroomduur dus juist 1/3 (in het algemeen $1/m$) periode. De doofhoek $\tau_d$, die tot $\tau_o = 60°$ constant was (180°), wordt dus nu gelijk aan $\tau_o + 120°$.

Dit alles blijft gelden totdat bij $\tau_o = 30°$ de in fig. 9d geschetste toestand is verkregen. Bij $\tau < 30°$ (bijv. $\tau''$ in fig. 9d) is de anodespanning van het ventiel in tak *1*, $v_1-v_3$, nog negatief. Fig. 9d geeft dus het geval weer waarin de ontsteking zoo vroeg mogelijk geschiedt.

Het oppervlak dat besloten is tusschen de dik geteekende krommen in fig. 9a-d en een stuk der $\tau$-as ter lengte van één periode, is in fig. 9d zoo groot mogelijk geworden. Daar dit oppervlak een maat is voor de gemiddelde spanning die de gelijkrichter levert, is deze spanning bij zoo vroeg mogelijke ontsteking het hoogst.

Al naar de stroomvorm in de uitwendige keten kan men dus twee bedrijfstoestanden van de gelijkrichter onderscheiden:

1) die met onderbroken stroom: impulsduur $\tau_d - \tau_o < 2\pi/m$; ontsteking „laat" ($\tau_o > \pi - 2\pi/m$);

2) die met niet-onderbroken stroom: impulsduur $\tau_d - \tau_o = 2\pi/m$; ontsteking „vroeg" ($\tau_o < \pi - 2\pi/m$).

In dit eenvoudige geval, waarin zelfinductie ontbreekt, treden aan de transformator in het geheel geen spanningssprongen op.

*Geval met spreiding en met zelfinductie en tegenspanning in de uitwendige keten*

Keeren wij nu terug naar de meer aan de werkelijkheid beantwoordende schakeling van fig. 8, waarin wij de spreidingszelfinducties $L_a$ en de vereffeningszelfinductie $L_0$ en -capaciteit $C_0$ niet langer nul onderstellen. $C_0$ zij weer zoo groot gekozen dat de spanning aan de klemmen van $C_0$ en $R$ als een rimpelvrije gelijkspanning $V_0'$ mag worden beschouwd. Het zooeven gemaakte onderscheid tusschen bedrijfstoestanden met onderbroken en met niet-onderbroken stroom kan ook nu worden gemaakt, al is niet zoo gemakkelijk als in het geval van fig. 9 aan te geven bij welke waarde van $\tau_o$ de overgang tusschen de beide toestanden optreedt. Het zal echter duidelijk zijn dat bij onderbroken stroom de $m$ takken geheel onafhankelijk van elkaar werken, zoodat voor elk van haar geldt hetgeen boven voor fig. 1 werd afgeleid. Ontsteekpieken volgens verg. (2) en doofpieken volgens verg. (3) treden dus weer op, en wel éénmaal per periode aan iedere zelfinductie $L_a$, doch $m$ maal per periode aan de zelfinductie $L_0$ (met een factor $L_0$ in plaats van $L_a$ in de teller). De doofhoek is nu niet $= \pi$, zooals in het eenvoudige geval van fig. 9a, maar de in fig. 3 voorgestelde functie van $\tau_o$ en $\varphi$. In plaats van $\tau_d$ kan men ook de impulsduur $\tau_d-\tau_o$ als functie van $\tau_o$ uitzetten; in fig. 3 is dit bij wijze van voorbeeld voor één waarde van $\varphi$ ($= 60°$) gedaan. Laat men, bij een gegeven waarde van $\varphi$, $\tau_o$ van $\pi$ af afnemen, dan bereikt de van 0 af aangroeiende impulsduur $\tau_d-\tau_o$ op een zeker punt de waarde $2\pi/m$; hier sluiten de opeenvolgende ventielstroomen juist bij elkaar aan. De waarde van $\tau_o$ waarbij dit geschiedt, is een functie van het aantal fasen $m$ en van $\varphi$. In fig. 3 is te zien dat voor $m = 3$ en $\varphi = 60°$ het grensgeval bij $\tau_o = 114°$ ligt.

Laten we $\tau_o$ nog verder afnemen, dan blijft nu niet, zooals in het spreidingslooze geval van fig. 9, de impulsduur $\tau_d-\tau_o$ constant $= 2\pi/m$, doch deze kan nog iets toenemen. Dat dit nu wèl kan, is te wijten aan de spreidingszelfinducties $L_a$. Beschouwen we van de $m$ takken een willekeurige, die we *1* noemen, op het oogenblik dat zij de voorafgaande tak (die dan de $m^{de}$ is) aflost. Kon in het geval van $L_a = 0$ de stroom plotseling van tak $m$ naar tak *1* overgaan (*fig. 10a*), met eindige waarden van $L_a$ geschiedt deze commutatie geleidelijk (fig. 10b): bij de ontsteking van ventiel *1* begint de stroom $i_1$ in tak *1* aan te groeien en de stroom $i_m$ in tak $m$ af te nemen. De commutatie is geëindigd, als de afnemende stroom (hier $i_m$) de waarde nul heeft bereikt.

Om de optredende spanningssprongen te kunnen berekenen, moeten wij de toestand die gedurende de commutatie heerscht, analyseeren. Teneinde daarbij onnoodige complicaties te vermijden, voeren wij weer een benadering in, die doorgaans in de practijk gerechtvaardigd is: we nemen nl. aan dat de stroom $i$ in de uitwendige keten constant, dwz. rimpelvrij is, en dus gelijk aan de gemiddelde waarde $I_0$ van de gelijkgerichte stroom.

Tijdens het commuteeren, dat, in hoekmaat uitgedrukt, een interval $\sigma$ in beslag neemt, geldt voor de keten, gevormd door transformatorspoel *1*, ventiel *1*, ventiel $m$ en spoel $m$:

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



$$V_{max} \sin \tau - \omega L_a \frac{di_1}{d\tau} + \omega L_a \frac{di_m}{d\tau} - V_{max} \sin (\tau + \frac{2\pi}{m}) = 0, \quad (14)$$

$$(\tau_o < \tau < \tau_o + \sigma).$$

Daar voorts $i_m = i - i_1$, en $di/d\tau$ krachtens de zoojuist ingevoerde benadering gelijk nul mag worden gesteld, volgt uit (14), na een kleine herleiding:

$$\omega L_a \frac{di_1}{d\tau} = - V_{max} \sin \frac{\pi}{m} \cos (\tau + \frac{\pi}{m}). \quad (15)$$

Gedurende het bedoelde commuteeringsinterval heeft de klemspanning van spoel *1* de waarde $V_{max} \sin \tau - \omega L_a di_1/d\tau$. Onmiddellijk vóór dit interval was spoel *1* onbelast en had zij dus de klemspanning $V_{max} \sin \tau$. Onmiddellijk er na is zij belast met de volle stroom $i = I_0$, die echter wegens zijn constantheid geen spanningsverlies in $L_a$ veroorzaakt; ook dan wordt dus de klemspanning van spoel *1* gegeven door $V_{max} \sin \tau$. De grootte der sprongen bij het begin ($\tau_o$) en het einde ($\tau_o + \sigma$) der commutatie van tak $m$ naar tak *1* bedraagt volgens (15):

$$\left.\begin{aligned} (\Delta v_1)_{\tau_o} &= V_{max} \sin \frac{\pi}{m} \cos (\tau_o + \frac{\pi}{m}), \\ (\Delta v_1)_{\tau_o + \sigma} &= - V_{max} \sin \frac{\pi}{m} \cos (\tau_o + \frac{\pi}{m} + \sigma). \end{aligned}\right\} \quad (16)$$

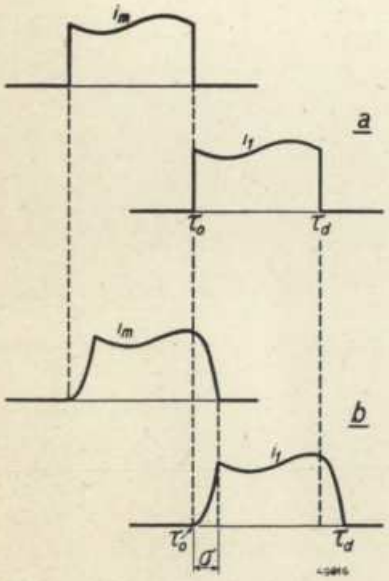



Fig. 10. Commutatie van de stroom van tak $m$ naar tak *1* *a*) Zonder spreiding ($L_a = 0$): $i_m$ wordt abrupt door $i_1$ afgelost; *b*) met spreiding: de commutatie geschiedt geleidelijk, in een interval $\sigma$.

We merken op dat de ontsteekstooten slechts van $\tau_o$, en niet van $L_a$, afhankelijk zijn; zij worden nul voor $\tau_o = \pi/2 - \pi/m$, d.i. bij de kleinst mogelijke ontsteekhoek. De stooten aan het einde der commutatie hangen wèl van $L_a$ af, daar $\sigma$ met $L_a$ toeneemt; in normale omstandigheden echter is $\sigma$ een kleine hoek (van de orde van enkele graden), zoodat deze stooten, op het teeken na, ongeveer even groot zijn als die aan het begin der commutatie.

Even groote sprongen, doch met tegengesteld teeken, vindt men in de klemspanning van dezelfde spoel *1* bij de commutatie van deze tak naar tak *2*. De klemspanningen van de spoelen der overige $m$—1 takken vertoonen hetzelfde beeld, echter in fase een geheel aantal malen $2\pi/m$ verschoven.

Beschouwen wij nu de spanning $v_{KS}$ aan de uitwendige keten, dus tusschen de punten $K$ en $S$ (fig. 8). Deze spanning heeft $(R + r) I_0$ tot gemiddelde waarde, maar zij bezit bovendien een groote rimpelcomponent, die door $L_0$ wordt opgenomen. Men zou kunnen meenen dat uit de onderstelling van een rimpelvrije gelijkgerichte stroom $i$ in de uitwendige keten volgt: $L_0 di/dt = 0$. Dit is echter in het algemeen onjuist, aangezien $i$ (een zeer bijzonder geval daargelaten) alleen constant kan zijn, als $L_0$ oneindig groot is. $L_0 di/dt$ is dan toch van nul verschillend.

Onmiddellijk vóór de commutatie van tak $m$ naar tak *1* is de spanning tusschen $K$ en $S$:

$$v_{KS} = v_m \quad \ldots\ldots\ldots \quad (17a)$$

en er na is zij:

$$v_{KS} = v_1 \ldots\ldots\ldots \quad (17b)$$

Tijdens de commutatie is $v_{KS} = v_1 - \omega L_a di_1/d\tau = v_1 - {}^1/_2 \omega L_a d(i_1 - i_m)/d\tau$, want $i_m = i - i_1$. Substitueert men hierin voor $d(i_1 - i_m)/d\tau$ de waarde die (14) hiervoor levert, dan krijgt men:

$$v_{KS} = {}^1/_2 (v_1 + v_m) \quad \ldots \quad (17c)$$

dus juist het gemiddelde der spanningen van de beide takken die bij de commutatie zijn betrokken.

Een en ander wordt verduidelijkt door *fig. 11*, die het spannings- en stroomverloop als functie van $\tau$ toont voor het geval $m = 3$, $\tau_o = 75°$. De dikke lijn in fig. 11*a* stelt de spanning $v_{KS}$ voor, volgens de verg. (17a, c en b). Fig. 11*b* maakt de stroomcommutatie van tak *3* naar tak *1* aanschouwelijk. (De vorm der stroomen vindt men door verg. (15) te integreeren en gebruik te maken van de randvoorwaarden: $i_1 = 0$ voor $\tau = \tau_o$; $i_1 = I_0$ voor $\tau = \tau_o + \sigma$.) Op het moment waarop ventiel *1* wordt ontstoken ($\tau = \tau_o$), daalt de klemspanning van spoel *1* met een bedrag $AB$ van $S_1A$ tot $S_1B$, en stijgt de spanning $v_{KS}$ met een even groot bedrag $BC$ van $S_1C$ tot $S_1B$. Bij het einde der commutatie van tak *3* naar tak *1* ($\tau = \tau_o + \sigma$) stijgen de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



beide genoemde spanningen van $S_2D$ tot $S_2E$.

Van de pulseerende spanning $v_{KS}$ worden de wisselspanningscomponenten geheel door $L_0$ opgenomen (als we $r$ weer verwaarloozen). Men treft dus op $L_0$ even groote spanningsstooten aan als op $L_a$

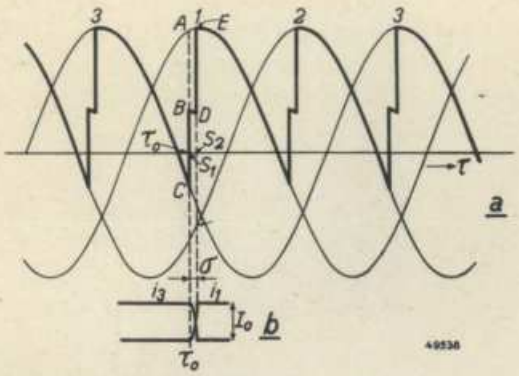



Fig. 11. Als functie van $\tau$ zijn voorgesteld: *a*) spanningen, *b*) stroomen, voor een gelijkrichter volgens fig. 8, met $\tau_o = 75°$. Dikke lijnen in *a*): spanning van $K$ ten opzichte van $S$. Bij het begin van de commutatie van tak *3* naar tak *1* treden de volgende spanningssprongen op: $AB$ in de klemspanning $v_1'$, $CB$ in de klemspanning $v_3'$ en tevens in de spanning $v_{KS}$. Aan het eind der commutatie maken $v_1'$ en $v_{KS}$ een sprong $DE$, $v_3'$ een sprong van $D$ naar de kromme *3*.

(zij het dat soms het teeken verschillend is), in tegenstelling dus met wat bij onderbroken stroom het geval is, waar de gelijktijdige spanningssprongen aan $L_a$ en $L_0$ zich verhouden als $L_a : L_0$. Dit is een gevolg van het feit dat op de oogenblikken der sprongen bij onderbroken stroom aan $L_a$ dezelfde waarde van $di/dt$ optreedt als aan $L_0$, doch dat bij niet-onderbroken stroom deze waarden verschillen.

### Invloed van parasitaire capaciteiten

In de bovenstaande beschouwingen hebben wij laten zien dat in gelijkrichters tijdens de normale werking spanningsstooten aan de zelfinducties optreden. De gevonden resultaten zijn in de *tabel I* geresumeerd. Wij brengen hier nog even onder de aandacht dat niet alleen enkele uitdrukkelijk vermelde benaderingen zijn ingevoerd, doch dat wij tevens stilzwijgend aan verschillende bijzonderheden zijn voorbijgegaan. Zoo zijn bijv. toestanden waarbij meer dan twee ventielen gelijktijdig in werking zijn, buiten beschouwing gelaten. Impedanties aan de primaire zijde van de transformator zijn nul ondersteld; niet is gesproken over de wijze waarop de primaire spoelen zijn geschakeld (in driehoek, in ster, enz.). Ingewikkelder schakelingen, zooals bijv. die van Grätz, welke veel in de practijk worden toegepast (zie bijv. het eerste der in noot [1]) aangehaalde artikelen), zijn niet behandeld, want een nadere beschouwing leert dat zij door aequivalente schakelingen van het type van fig. 8 mogen worden vervangen. Het is echter hier niet noodig, op al deze finesses in te gaan.

Bij het beschouwen van de in de tabel verzamelde formules zal het treffen dat geen der spanningsstooten belangrijk grooter dan $V_{max}$ kan worden, en dat zij meestal zelfs veel kleiner zullen zijn. Ondanks hun optreden wordt het potentiaalverschil tusschen de einden van een secundaire transformatorspoel nooit grooter dan $V_{max}$. Niettemin zijn in transformatoren, welker isolatie men toch volkomen tegen een topspanning $V_{max}$ bestand mocht achten, doorslagen voorgekomen. Hoe kunnen deze worden verklaard? Het antwoord is te zoeken in een tot nu toe niet in onze beschouwingen betrokken omstandigheid, nl. de aanwezigheid van parasitaire capaciteiten.

Deze capaciteiten beïnvloeden de toestand in verschillende opzichten, ofschoon zij in het algemeen zoo klein zijn dat zij in de verg. (1) voor de hoofdstroom $i$ niet in aanmerking genomen behoeven te worden. In de eerste plaats vormen zij trillings-

**Tabel I.** Overzicht van de grootte der spanningsstooten aan $L_a$ en $L_0$, bij afwezigheid van parasitaire capaciteiten. Op het teeken is niet gelet, daar dit voor onze beschouwingen zonder belang is.

| Bedrijfstoestand | | Ontsteken | Dooven |
|---|---|---|---|
| Onderbroken stroom | In $L_a$: | $\frac{L_a}{L_0+L_a}(\sin\tau_o - q)\,V_{max}$ | $\frac{L_a}{L_0+L_a}(\sin\tau_d - q)\,V_{max}$ |
| | In $L_0$: | $\frac{L_0}{L_0+L_a}(\sin\tau_o - q)\,V_{max}$ | $\frac{L_0}{L_0+L_a}(\sin\tau_d - q)\,V_{max}$ |
| Niet-onderbroken stroom | In $L_a$: | $\sin\frac{\pi}{m}\cos(\tau_o+\frac{\pi}{m})\,V_{max}$ | $\sin\frac{\pi}{m}\cos(\tau_o+\frac{\pi}{m}+\sigma)\,V_{max}$ |
| | | en even groote stooten een tijd $\frac{2\pi}{\omega m}$ later | |
| | In $L_0$: | Hetzelfde als in $L_a$ | |

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



kringen met de zelfinducties ($L_a$ of $L_0$), waaraan zij zijn parallelgeschakeld. Door de spanningsstooten worden deze kringen aangestooten, zoodat zij gaan trillen in hun eigenfrequentie, welke gewoonlijk veel hooger is dan de netfrequentie. Daardoor is niet langer juist hetgeen in de vorige alinea werd beweerd, nl. datde spanning over een transformatorspoel niet grooter dan $V_{max}$ zou kunnen worden. In een fractie van een periode der netfrequentie is immers de spanning aan de trillingskring van teeken omgekeerd en voegt zij zich nu bij de oogenblikswaarde der transformatorspanning. Aan de schakeling van *fig. 12* is het oscillogram van *fig. 13* opgenomen, waarop de trillingen goed te zien zijn. Dat de spanningspiek zich snel een aantal malen herhaalt, brengt bovendien de kans op een trapsgewijze doorslag mee.

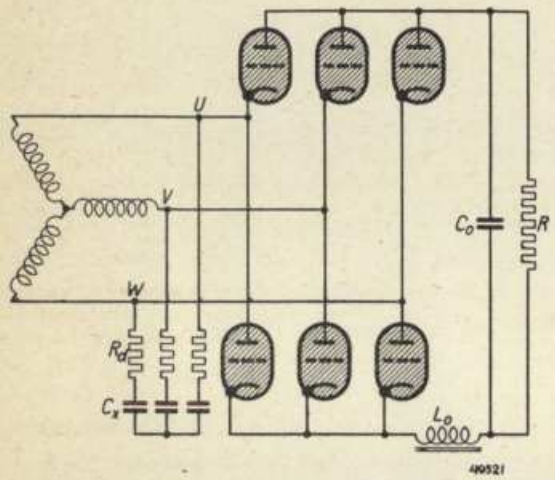



Fig. 12. Schakeling volgens Grätz, waaraan de spanning tusschen de punten $U$ en $V$ is weergegeven in de oscillogrammen fig. 13 en 16. De functie der capaciteiten $C_x$ en der dempweerstanden $R_d$ wordt later besproken.

Een tweede effect van de aanwezigheid der capaciteiten is hun invloed op de verdeeling der spanningsstooten, en wel in het bijzonder de verdeeling over de afzonderlijke windingen van de secundaire transformatorspoelen of van de smoorspoel. Dat een spanningsstoot zich zeer ongelijkmatig over de windingen kan verdeelen, was reeds bekend in de jaren toen men bovengrondsche leidingen voor hooge spanningen begon aan te leggen en de ervaring opdeed dat bij blikseminslag de isolatie der uiterste windingen van de op deze leidingen aangesloten transformatoren het vaakst beschadigingen vertoonde [3]). Om hier een inzicht in te krijgen is het niet voldoende dat we de parasitaire capaciteiten eenvoudig als aan de spoelen parallelgeschakelde capaciteiten beschouwen, maar moeten we in aanmerking nemen dat naburige windingen zoowel onderling als ten opzichte van aarde capaciteit bezitten. Zoo komen we tot een

Fig. 13. Foto van een oscillogram van de spanning tusschen $U$ en $V$ in een gelijkrichter volgens fig. 12, voor $C_x = 0$ en $R_d = 0$. De spanningssprongen die bij het commuteeren optreden, stooten trillingskringen aan, gevormd door spreidingszelfinductie en parasitaire capaciteit.

vervangingsschema als *fig. 14*, waarin deze capaciteiten met $K$ resp. $C$ zijn aangegeven. Zij hebben tot gevolg dat een plotselinge spanningsverandering van het spoeleinde $a$ zich aanvankelijk geenszins gelijkmatig over de geheele spoel verdeelt, maar dat de windingen aan de zijde $a$ een onevenredig groot deel van de spanningsstoot te verduren krijgen, zoodat de isolatie daar gevaar kan loopen. De spanningsverdeeling is ongelijkmatiger naarmate de spanning van het punt $a$ sneller verandert.

Dat men zich niet om het teeken van de spanningsstoot (in vergelijking met het teeken van $V_{max} \sin \tau$ op het oogenblik waarop de stoot optreedt) behoeft te bekommeren, zal wel duidelijk zijn, gezien het feit dat enkele windingen waartusschen

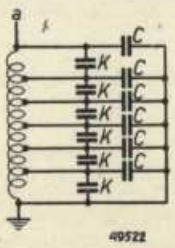



Fig. 14. Vervangingsschema van een spoel met parasitaire capaciteiten $K$ tusschen naburige windingen, en parasitaire capaciteiten $C$ van de windingen ten opzichte van de aarde.

normaal slechts een kleine fractie van de spanning $V_{max} \sin \tau$ heerscht, met de volle spanningsstoot worden belast.

Niet alleen deze „interne" verdeeling van de stoot wordt door de capaciteiten beïnvloed, doch ook de fracties die de smoorspoel resp. de transformator

[3]) Zie bijv. K. W. Wagner, Das Eindringen einer elektromagnetischen Welle in eine Spule mit Windungskapazität, E.u.M. **33**, 89-92 en 105-108, 1915.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



elk voor hun rekening nemen. Deze waren in het capaciteitslooze geval, bij onderbroken stroom, $L_a/(L_0 + L_a)$ en $L_0/(L_0 + L_a)$. Zonder dat we hier uitvoerig op ingaan, zal het duidelijk zijn dat de capaciteiten, vooral op het eerste oogenblik, deze verhouding geheel kunnen veranderen.

**Maatregelen ter vermindering van het gevaar der spanningsstooten**

Wij zullen nu enkele maatregelen bespreken welke dienen om het gevaar der spanningsstooten te verminderen.

Zeer voor de hand ligt de van oudsher bekende extra isolatie van de uiterste windingen van de secundaire transformatorspoelen. Niet altijd is dit echter in afdoende mate eenvoudig uitvoerbaar. Men zal dus trachten de stooten zelf zoo klein mogelijk te houden. Hierbij dient men onderscheid te maken tusschen de toestand tijdens het in bedrijf stellen van de zender, waarbij men de gelijkspanning van nul af geleidelijk opvoert, en de normale bedrijfstoestand, waarbij de verkregen gelijkspanning ongeveer de maximale is die de gelijkrichter kan leveren. Bij het opvoeren van de gelijkspanning doorloopt de ontsteekhoek $\tau_o$ een reeks waarden, van ca $\pi$ tot een zeker minimum; hierbij passeert $\tau_o$ de waarde, waar de toestand van onderbroken stroom in die van niet-onderbroken stroom overgaat. Letten wij eerst op de normale bedrijfstoestand, waarbij de stroom niet onderbroken is. Aan het begin en aan het eind van iedere commutatie treden stooten op, waarvan de grootte volgens verg. (16) evenredig is met $\cos(\tau_o + \pi/m)$ resp. met $\cos\{\tau_o + (\pi/m) + \sigma\}$.

Zooals reeds werd opgemerkt, worden de stooten die aan het begin der commutatie optreden, nul, als $\tau_o = \pi/2 - \pi/m$, dus als de ontsteking zoo vroeg mogelijk geschiedt, d.i. als de gelijkspanning zoo hoog mogelijk is. Het is dus wenschelijk de gelijkrichter zoo te ontwerpen dat deze hoogste gelijkspanning tevens de gevraagde spanning is. De spanningsstooten aan het einde der commutatie zijn bij de vroegst mogelijke ontsteking slechts gering, nl. evenredig met $\cos(\pi/2 + \sigma)$; $\sigma$ is een hoek van gewoonlijk slechts eenige graden.

Er kunnen zich echter omstandigheden voordoen die een tijdelijk gebruik van een lagere bedrijfsspanning noodzakelijk maken, waarbij men op ongunstiger waarden van $\tau_o$ moet instellen. Bovendien doorloopt $\tau_0$ deze telkens bij het reeds vermelde opregelen van de spanning. Men zal zich dus tegen de daarmee gepaard gaande spanningsstooten moeten wapenen.

De middelen die ons, behalve de reeds genoemde extra isolatie, nog ten dienste staan om de spanningsstooten onschadelijk te maken, deelen we in drie groepen in:

a) condensatoren parallel aan de transformator,
b) smoorspoelen in serie met de ventielen,
c) een combinatie van a) en b),

welke middelen aangevuld dienen te worden met

d) het aanbrengen van dempweerstanden.

a) *Condensatoren parallel aan de transformator*

Een werkzaam middel om de commutatiestooten te verzwakken is het aanbrengen van condensatoren ($C_1 \ldots C_m$ in *fig. 15*) tusschen het sterpunt en de anoden der ventielen. Even voor het

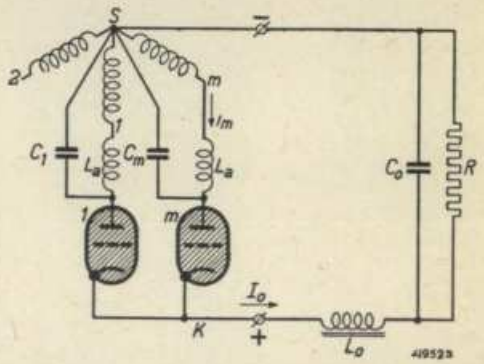



Fig. 15. Twee in fase opeenvolgende takken ($m$ en $1$) van een gelijkrichter met $m$ fasen, voorzien van condensatoren $C_1 \ldots C_m$. De ontsteekpieken worden door deze condensatoren verkleind.

ventiel *1* wordt ontstoken, heeft de condensator $C_1$ een hoogere spanning dan de condensator $C_m$ in de voorafgaande tak. Bij het ontsteken van het ventiel *1* zal aan $C_1$ plotseling lading worden onttrokken, en wel in hoofdzaak doordat er een stroom gaat circuleeren in de kring, gevormd door $C_1$, de ventielen *1* en *m*, en $C_m$. Dit circuit bevat bijna geen zelfinductie en weerstand; de genoemde stroom — die in het ventiel *m* tegengesteld aan de daar nog vloeiende stroom $i_m = I_0$ is gericht — zal dus zeer snel aangroeien en bijna terstond de waarde $I_0$ hebben bereikt. De stroom in ventiel *m* is dan nul geworden; hij kan niet van richting omkeeren, zoodat het ventiel *m* gedoofd is; de stroom $i_m$ in de transformator echter vloeit nu naar $C_m$. De spanning aan deze condensator stijgt daardoor al spoedig zoo ver dat ventiel *m* opnieuw ontsteekt, na slechts een kleine fractie van een periode stroomloos te zijn geweest. Tijdens deze tweede stroomimpuls, die geleidelijk nul wordt, werken de ventielen *m* en 1 gelijktijdig. Bij voldoende grootte van de capaciteit $C_x$ der condensatoren $C_1 \ldots C_m$ zijn de spanningssprongen kleiner dan de normale commuteeringsstooten, die bij afwezigheid dezer condensatoren aan $L_a$ zouden op-

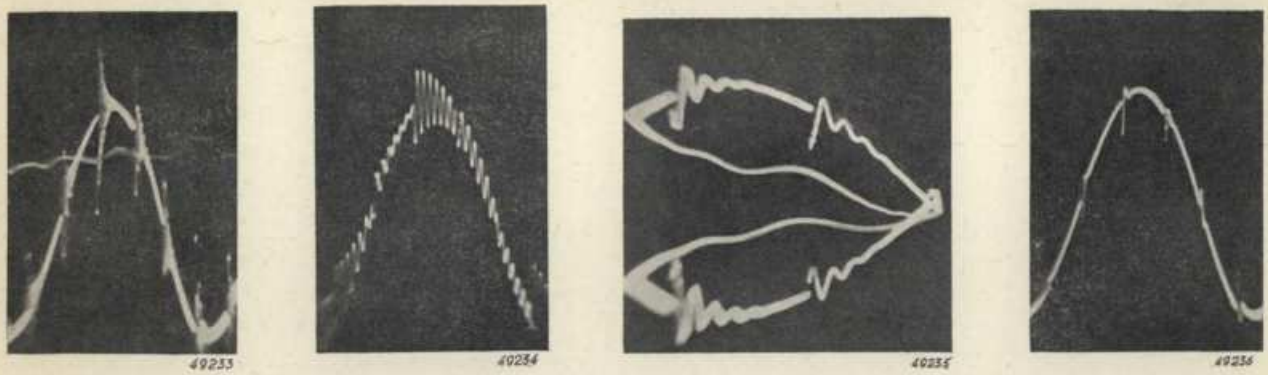
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



treden. De *figuren 16a* en *b*, die zijn opgenomen aan de schakeling van fig. 12 met verschillende waarde van $C_x$, laten dit zien: bij (*b*), waar $C_x = 7000$ pF, is de grootste amplitude der gesuperponeerde trilling kleiner dan bij (*a*), waar $C_x = 0$. Natuurlijk kan men $C_x$ niet willekeurig groot kiezen, daar men rekening moet houden met de prijs dezer condensatoren en met de belasting die zij voor de transformator vormen.

In werkelijkheid echter zullen de steeds aanwezige parallelcapaciteiten de verdeeling van de spanningssprong beheerschen. Dit maakt de toestand nog gunstiger, aangezien men de parasitaire capaciteiten van de smoorspoel gemakkelijk klein kan houden ten opzichte van die van de transformatorspoel, bijv. door de smoorspoel zonder kern uit te voeren en de lengte groot te maken in verhouding tot de diameter. Hierdoor is zij tevens gemakkelijk




*a* *b* *c* *d*

Fig. 16. Oscillogrammen van de spanning tusschen $U$ en $V$ in de schakeling van fig. 12, voor verschillende waarden van $C_x$ en $R_d$.
*a*) $C_x = 0$, $R_d = 0$: hooge spanningspieken met een steil front, gevolgd door een gedempte trilling.
*b*) $C_x = 7000$ pF, $R_d = 0$: lagere, minder steile pieken, gevolgd door een gedempte trilling.
*c*) $C_x = 7000$ pF, $R_d = 3000$ ohm: front steiler dan bij (*b*), doch demping veel grooter. (N.B. Andere tijdschaal dan de overige oscillogrammen, waardoor de negatieve halve golf onder de positieve halve golf is afgebeeld).
*d*) $C_x = 7000$ pF, $R_d = 10\,000$ ohm: steil front; demping nog grooter dan bij (*c*).

De in fig. 16*b* zichtbare trillingen treden op in de kring gevormd door $L_a$ en $C_x$. Een globale berekening toont aan dat de spanningsamplitude van deze trilling bij benadering gegeven is door $(1/R)\cdot\sqrt{L_a/C_x}\cdot V_0$. Laten we een maximale waarde $= kV_0$ toe, dan volgt hieruit:

$$C_x \geqq L_a/k^2R^2,$$

waarin $k$ bijv. 0,2 kan bedragen.

Een bovenste grens voor $C_x$ volgt uit de overweging dat het om economische redenen wenschelijk is de component met de netfrequentie van de door $C_1 \ldots C_m$ vloeiende stroomen in amplitude klein ten opzichte van $I_0$ te houden, stel maximaal $hI_0$. Hieruit volgt:

$$C_x \leqq \frac{h}{\omega R},$$

met $h$ bijv. $= 0{,}1$.

b) *Smoorspoelen in serie met de ventielen*

Een andere methode ter beveiliging van de transformator bestaat hierin dat tusschen het uiteinde van elk der secundaire transformatorspoelen en de anode van het bijbehoorende ventiel een smoorspoel wordt geschakeld (zelfinductie $L_x$). Bij afwezigheid van parasitaire en van de onder (*a*) genoemde extra capaciteiten zou van een in de anodekring opgewekte spanningsstoot nog slechts de fractie $L_a/(L_x+L_a)$ ten laste van de transformator komen. In werkelijkheid echter zullen de steeds aanwezige parallelcapaciteiten de verdeeling van de spanningssprong beheerschen. Dit maakt de toestand nog gunstiger, aangezien men de parasitaire capaciteiten van de smoorspoel gemakkelijk klein kan houden ten opzichte van die van de transformatorspoel, bijv. door de smoorspoel zonder kern uit te voeren en de lengte groot te maken in verhouding tot de diameter. Hierdoor is zij tevens gemakkelijk bestand te maken tegen de spanningsstooten, waarvan zij nu het leeuwendeel te verduren krijgt.

c) *Combinatie van parallelcondensatoren en seriesmoorspoelen.*

Het ligt voor de hand de methoden a) en b) te combineeren. Het vergrooten van de parasitaire transformatorcapaciteit door er een capaciteit $C_x$ aan parallel te schakelen verhoogt de werking van de smoorspoelen, die derhalve kleiner en goedkooper gemaakt kunnen worden.

d) *Het aanbrengen van dempweerstanden*

Zooals men uit fig. 16*a* en *b*, ziet, trillen door het aanbrengen van de capaciteiten $C_x$ de parasitaire trillingskringen langzamer uit. Daar in het algemeen deze trillingen ongewenscht zijn, zal men de demping groot trachten te maken. Dit kan men bij de kring waarvan $L_a$ deel uitmaakt, doen door weerstand òf in serie met $L_a$, òf in serie met $C_x$, òf parallel aan $C_x$ te plaatsen. Het eerste zou groote verliezen meebrengen, daar de weerstand door de hoofdstroom zou worden doorloopen. Het tweede is minder gunstig, daar een weerstand in serie met $C_x$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



deze capaciteit zou verhinderen de plotselinge stroomstoot te leveren waar het beoogde effect op berust. Men ziet dit in fig. 16*c* en *d* in vergelijking met fig. 16*b*: door het toevoegen van weerstand is de demping vergroot, maar er treden weer steile fronten op, die in fig. 16*b* ontbreken.

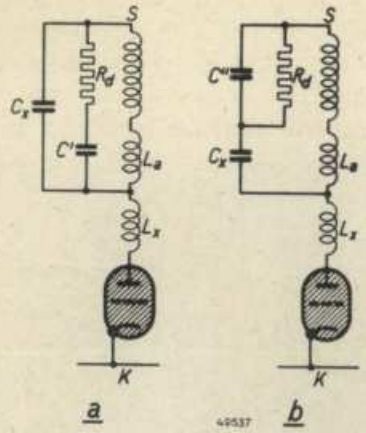



Fig. 17. Twee methoden om de trillingskring die oorspronkelijk uit $L_a$ en $C_x$ bestond, te voorzien van een dempweerstand $R_d$ zonder dat hierin een groot energieverlies optreedt. Bij *a*) is in serie met $R_d$ een capaciteit $C'$ geschakeld, waarvan de reactantie bij de eigen frequentie $f_0$ van de kring van de orde van $R_d$ is, doch bij de netfrequentie $f$ groot ten opzichte van $R_d$. Bij *b*) is $C''$ zoo gekozen dat bij de frequentie $f_0$ door $R_d$ voldoende demping wordt teweeg gebracht, en bij de frequentie $f$ door $C_x$ en $C''$ een spanningsdeeler wordt gevormd, die de spanning met deze frequentie aan $R_d$ verlaagt.

Het parallelschakelen van weerstand aan $C_x$ heeft het bezwaar dat wederom groote verliezen in de dempweerstand zouden optreden, en wel door de hooge spanning met de netfrequentie die aan $C_x$ aanwezig is. Men kan dit ondervangen door te werk te gaan volgens *fig. 17a* of *b*, zooals in het onderschrift is toegelicht.

De trillingskring, gevormd door de smoorspoel $L_x$ met haar parasitaire capaciteit kan gedempt worden door er een weerstand aan parallel te schakelen. Bij de filtersmoorspoel zal men bij voorkeur gebruik maken van een dempweerstand in serie met een capaciteit.

De besproken maatregelen zijn met succes in verschillende zenders toegepast, waardoor storingen ten gevolge van isolatiedoorslag, die aanvankelijk wel eens moeilijkheden opleverden, zich niet meer hebben voorgedaan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



# ONDERZOEK MET DE KATHODESTRAALOSCILLOGRAAF VAN DE AFKOELING DOOR HARDINGSVLOEISTOFFEN [1])

621.785.65:
621.317.35

Het harden van staal geschiedt gewoonlijk door het, na verhitting tot ca 800 °C, snel af te koelen door onderdompeling in een vloeistof („afschrikken"). Bij deze afkoeling kan men drie opeenvolgende fasen onderscheiden:

1) langzame koeling, doordat een damplaag om het te harden voorwerp dit min of meer isoleert;
2) snelle koeling, waarbij de vloeistof in de naaste omgeving van het voorwerp kookt, doch geen damplaagje meer aanwezig is;
3) langzame koeling, nadat de temperatuur onder het kookpunt is gedaald.

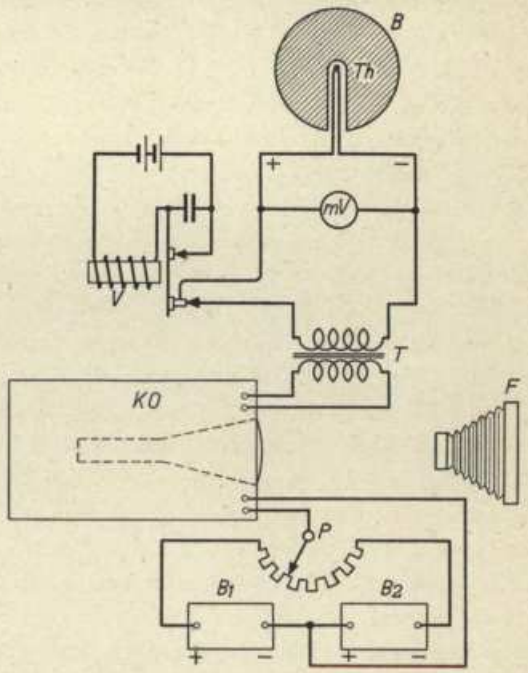
Voor het slagen van het hardingsproces is het van belang dat de beide eerste fasen kort duren, teneinde een omzetting van het austeniet te voorkomen; hiervoor is het tevens gewenscht dat het kookpunt van de hardingsvloeistof bij ca 400 °C ligt.

Aan deze eischen blijkt men met bijv. koolzaadolie te kunnen voldoen. Deze heeft echter, als alle plantaardige en ook dierlijke oliën, de onaangename eigenschap door inwerking van zuurstof van samenstelling te veranderen; zij wordt daarbij dik en kleverig, en verliest grootendeels haar goede koeleigenschappen. Daarom geeft men gewoonlijk de voorkeur aan minerale oliën, ofschoon hiermee het hardingsproces minder gunstig verloopt dan met koolzaadolie. Hun grootere chemische bestendigheid geeft hier de doorslag. Bij een onderzoek is gebleken dat koolzaadolie in een bepaalde tijd meer dan zes maal zooveel zuurstof opneemt als gewone minerale olie.

De vraag rees nu of er niet een mengsel met minerale olie als hoofdbestanddeel zou zijn samen te stellen dat in koelingseigenschappen koolzaadolie nabij komt, doch de nadeelen er van mist.

Hiervoor moest in de eerste plaats een meetmethode worden ontwikkeld, om het verloop van het koelingsproces te kunnen bestudeeren. De hieronder beschreven methode heeft zeer goed voldaan.

Gebruik wordt gemaakt van een massief zilveren bol van 20 mm diameter, waarin zich een thermo-element bevindt, in goed warmtecontact met het zilver. De bol wordt verhit tot ca 800 °C, welke temperatuur gecontroleerd wordt met behulp van een met het thermo-element verbonden millivoltmeter. Vervolgens dompelt men de bol in de te onderzoeken olie. In principe zou men er nu mee kunnen volstaan, de uitslag van de millivoltmeter met korte tusschenpoozen af te lezen, en deze




49005

Fig. 1. $B$ = zilveren bol, die na verhitting tot ca 800 °C in de te onderzoeken koelvloeistof wordt gedompeld. $Th$ = thermo-element, waarvan de EMK op een millivoltmeter wordt afgelezen en met behulp van een triller $V$ en een transformator $T$ in een wisselspanning wordt omgezet. Deze laatste wordt aan de versterker voor de verticale uitslag van de kathodestraaloscillograaf $KO$ toegevoerd. De spanning voor de tijdas wordt verkregen door middel van een potentiometer $P$, welks arm één slag maakt in de gewenschte tijd (bijv. 25 sec) en die is aangesloten op de twee batterijen $B_1$ en $B_2$. $F$ = fototoestel voor het fotografeeren van de oscillograafbeelden.

aflezingen, omgerekend in temperaturen, in een grafiek als functie van de tijd uit te zetten. Zooals aanstonds zal blijken, verloopt het proces iets te vlug om dit met de gewenschte nauwkeurigheid mogelijk te doen zijn; soms duren bepaalde fasen er van namelijk slechts 2-3 sec. Deze moeilijkheid is opgelost door het verloop van de electromotorische kracht van het thermo-element op het scherm van een kathodestraaloscillograaf zichtbaar te maken en dit beeld te fotografeeren.

Daar de thermokracht te klein is om bij rechtstreeksche aansluiting op de platen van de oscillograaf een zichtbare uitslag te geven, is versterking noodig. Om de normale versterker van de oscillo-

[1]) De gegevens voor dit artikel zijn ontleend aan een artikel van B. Levy van de Aktiebolaget Wahlén & Block, Stockholm, verschenen in „Electronisch Meten" (1, no. 4, 1946), een regelmatig verschijnende publicatie van Philips, waarin toepassingen der electronische meettechniek worden besproken. Het beschreven onderzoek werd verricht in samenwerking met de Svenska Aktiebolaget Philips te Stockholm.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



graaf te kunnen gebruiken voor het versterken van deze gelijkspanning, zet men deze in een wisselspanning om met behulp van een triller en een transformator, zooals in *fig. 1* is aangegeven; deze transformator levert de spanning die aan de versterker van de oscillograaf wordt toegevoerd en de verticale uitslag veroorzaakt. Om betrouwbare resultaten te krijgen, dient men een robuust geconstrueerde triller te gebruiken en aandacht aan de contacten te besteden. Met contacten van wolfraam werden slechte ervaringen opgedaan, doch een alliage van 93% goud en 7% platina [2]) voldeed zeer goed. Voorts dient men de keten voor het in gang houden van de triller goed af te schermen, om te voorkomen dat deze keten storende spanningen in de meetkring induceert.

Wat de horizontale uitslag betreft, hiervoor is de tijdbasis van de gebruikelijke oscillografen niet bruikbaar, aangezien het op te nemen verschijnsel wel 30 à 60 sec kan duren. Daarom werd de in fig. 1 aangegeven methode gebruikt, waarin de arm van een potentiometer door een gramofoonmotor wordt gedraaid. Tusschen de motor en de potentiometeras bevinden zich een regelbare overbrenging en een electromagnetische koppeling, welke laatste door tusschenkomst van een relais in werking treedt, zoodra de bol in de olie valt.

Na het in werking stellen van de triller verschijnt op het scherm van de oscillograaf een verticale streep, die zich, bij de beginstand van de potentiometer, geheel links bevindt. Door de draaiing van de potentiometerarm gaat hij over in een min of meer sinusvormige lijn, die ten gevolge van het afkoelen van de bol geleidelijk in amplitude afneemt. De toppen vormen daarbij twee symmetrisch gelegen afkoelingskrommen. Het beeld laat zich goed fotografeeren, zooals uit *fig. 2* blijkt.

Fig. 2*a* toont de opgenomen afkoelingskromme voor koolzaadolie. De grootste verticale uitslag komt overeen met 800 °C, de horizontale uitslag met 23 sec. Duidelijk kan men hier de in de aanvang genoemde drie fasen onderscheiden; de eerste en de tweede fase, waarna de temperatuur tot ca 400 °C is gedaald, duren hier elk 2-3 sec. Blijkens de ervaring verloopt het harden van staal hiermee gunstig. Bij een gewone minerale smeerolie echter duurt de eerste fase 12-13 sec (fig. 2*b*), hetgeen te lang is om een goede harding tot stand te doen komen.

Het opnemen van een groot aantal van dergelijke diagrammen heeft geleid tot de samenstelling van hardingsoliën met betere afkoelingskrommen dan tot nu toe bekend waren. Fig. 2*c* toont de kromme voor zulk een olie.

Tot slot zij hier nog de aandacht gevestigd op een kwestie die voor de hardingspractijk van groot belang is. In deze practijk is algemeen bekend dat hardingsoliën goed watervrij dienen te zijn. In het verloop van de afkoelingskromme komt de invloed van spoortjes water duidelijk tot uitdrukking. Men vergelijke slechts de kromme van een watervrije minerale olie (fig. 2*b*) met die van dezelfde olie met 0,2% water (fig. 2*d*): in het laatste geval is de afkoeling in de tweede fase veel heftiger. Scheuren van het werkstuk is hierbij haast onvermijdelijk.

Het gebruik van de kathodestraaloscillograaf met een eenvoudige hulpapparatuur heeft hier dus niet alleen tot een verbeterd product — i.c. hardingsolie — geleid, maar maakt ook een eenvoudige en gevoelige kwaliteitscontrôle mogelijk.

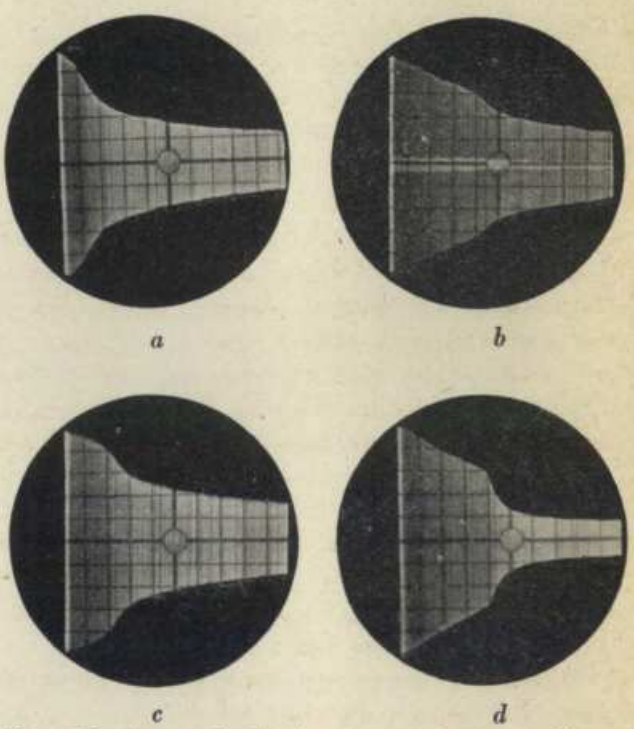



Fig. 2. Foto's van afkoelingskrommen, verkregen met diverse oliën. De grootste verticale uitslag komt overeen met 800 °C, de horizontale uitslag met 23 sec.

*a*) Koolzaadolie. De eerste en de tweede fase (langzame resp. snelle afkoeling) duren hier tezamen ca 5 sec, hetgeen gunstig is voor het harden van staal. Wegens haar geringe houdbaarheid zijn plantaardige oliën echter voor de practijk minder geschikt.

*b*) Een minerale olie. De duur van de eerste fase, ca 13 sec, is te lang voor het harden van staal.

*c*) Het onderzoek heeft geleid tot een mengsel met minerale olie als hoofdbestanddeel, dat een gunstig verloop van de afkoelingskromme combineert met een groote houdbaarheid.

*d*) Een gering watergehalte heeft groote invloed op de afkoelingskromme: de olie, die in droge toestand de kromme (*b*) oplevert, geeft bij 0,2% watergehalte een kromme als bij (*d*) is weergegeven. De afkoeling geschiedt dan in de tweede fase zoo snel dat meestal breuk van het stalen werkstuk optreedt.

[2]) Benedicks en Härdén, Z. techn. Phys. **13**, 71, 111, 166 (in het bijzonder 113), 1932.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



## IN MEMORIAM DR. P. J. BOUMA

Wij willen op deze plaats de nagedachtenis eeren van Dr. Pieter Johannes Bouma, geboren te Amsterdam op 14 April 1908 en overleden te Eindhoven op 19 Januari 1947. Bouma was van 1928 tot 1930 als assistent en sinds 1933 als natuurkundige verbonden aan het Philips Laboratorium te Eindhoven. Van 1930 tot 1933 studeerde hij te Utrecht, waar hij in November 1933 bij Ornstein promoveerde op het proefschrift: „Beitrag zur Dynamik der flüssigen Kristalle". Bouma's specialiteit werden de verlichtingskunde en de colorimetrie. Verscheidene publicaties van zijn hand op deze gebieden verschenen o.a. in Physica en in de Proceedings van de Kon. Ned. Akad. v. Wetenschappen. Daarnaast schreef hij talrijke artikelen in Philips Technisch Tijdschrift. Bouma was een gewaardeerd medewerker van de Ned. Stichting voor Verlichtingskunde.

Sinds 1940 leed Bouma aan een aandoening van het centrale zenuwstelsel, die zijn scherp verstand onaangetast liet, maar hem in toenemende mate spreken en schrijven bemoeilijkte. Desniettemin voltooide hij in de tijd van September 1944 tot April 1945 het manuscript van zijn boek „Kleuren en kleurindrukken" en nog een drietal publicaties.

Gedurende het jaar 1946 namen zijn krachten af, maar hij kon zich nog verheugen in de uitgave van het genoemde boek, dat in November 1946 verscheen (een bespreking van de inhoud van het boek vindt men op pag. 159 van dit nummer).

Het onderstaande artikel is een nagenoeg ongewijzigde bewerking van een voordracht, door Bouma in 1940 te Utrecht gehouden voor een Vacantieleergang over Straat- en Wegverlichting.

DE REDACTIE.

## HET WAARNEMEN OP DE WEG BIJ LAGE HELDERHEDEN

door P. J. BOUMA †.

628.971.6:612.843.6

In dit artikel worden de factoren besproken die het zien bij lage helderheden beïnvloeden, vooral in verband met de wegverlichting. Achtereenvolgens komen ter sprake: contrastgevoeligheid, herkenbaarheid van het object, waarnemingssnelheid, verblinding, gelijkmatigheid van de verlichting, Purkyně effect, de invloed van de kleuren op de waarneming.

Het doel van de wegverlichting is: de mogelijkheid scheppen om op de weg aanwezige voorwerpen te zien. Hieruit volgt direct, dat men bij het ontwerpen van de verlichting rekening moet houden met de eigenschappen van het oog. De prestaties van ons oog hangen, zooals later nog blijken zal, sterk af van het helderheidsniveau: in het algemeen zien we beter, naarmate dit niveau hooger wordt. In verband hiermee zouden wij ook bij de wegverlichting graag zeer hooge verlichtingssterkten willen toepassen. Hier wordt ons echter een grens gesteld door de economische overwegingen, waardoor we in het algemeen niet hooger zullen mogen gaan dan enkele tientallen lux. Vergeleken met de overdag optredende verlichtingssterkten van vaak eenige tienduizenden lux is dit uiterst weinig. Dat we desondanks nog iets kunnen zien, is aan het bewonderenswaardige aanpassingsvermogen van ons oog te danken (pupilverwijding, aanpassing van het netvlies); we zien echter altijd veel slechter dan bij hooge intensiteiten.

Uit een en ander volgt, dat we zeer zuinig met het licht moeten omspringen; met andere woorden:

1) Voor het beschikbare geld moeten we zooveel mogelijk energie (gewoonlijk electrische energie) zien te krijgen.
2) Per verkregen kW moeten we zooveel mogelijk lumens trachten te verkrijgen, dwz. we moeten lampen met een hoog nuttig effect toepassen.
3) De verkregen lumens moeten we met weinig verlies en op de gunstigste wijze op de weg werpen. Hiertoe moeten goede armaturen gebruikt worden, waarbij terdege rekening dient te worden gehouden met de eigenschappen van het wegdek.
4) Bij het ontwerpen van de installatie dienen we steeds rekening te houden met de eigenschappen van ons oog, waarbij we ons telkens de volgende beide vragen moeten stellen:
   a) Onder welke omstandigheden werkt ons oog het beste?
   b) In hoeverre zijn deze omstandigheden te verwezenlijken?

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Dit laatste valt dikwijls niet mee, daar de verlichtingstechnicus over een aantal factoren niet naar willekeur kan beschikken (reflectie-eigenschappen van het wegdek en de zich daarop bevindende objecten, omgeving van de weg, grootte van de lichtbronnen, enz.).

Wij zullen ons beperken tot punt (4) en in het bijzonder de in de literatuur aanwezige gegevens verzamelen omtrent punt (4a).

Het onderzoek naar de prestaties van ons oog kan met zeer uiteenloopende methoden aangepakt worden. Dit wordt het beste geïllustreerd door twee uitersten te noemen. Het eene uiterste bestaat hierin, dat we het verkeer langs de verlichte wegen observeeren en uit de ongevallenstatistiek trachten vast te stellen, welk verlichtingssysteem de beste waarnemingsmogelijkheden heeft geboden. Het andere uiterste bestaat hierin, dat we in studeerkamer en laboratorium het proces van het zien in al zijn onderdeelen uiteenrafelen, elk onderdeel apart aan een experimenteel onderzoek onderwerpen en uit deze onderdeelen een theorie van het zien op de weg opbouwen. Dit kan gebeuren zonder dat wij naar een verlichte weg gekeken hebben. Daar beide genoemde methoden groote in het oog springende nadeelen hebben, zullen we moeten trachten hier een gulden middenweg te vinden. Deze kan naar ons inzicht het beste hierin bestaan, dat we volgens de tweede methode de onderdeelen van het zien in het laboratorium onderzoeken, maar herhaaldelijk door metingen op de weg de verkregen resultaten en inzichten aan de practijk toetsen.

Op deze wijze zal getracht worden in hetgeen volgt een overzicht te geven van een aantal belangrijke problemen in verband met het zien bij de lage helderheden, die bij de wegverlichting optreden.

**Opmerken**

Een object op de weg wordt opgemerkt dank zij het bestaan van een contrast, dwz. doordat de helderheid van het object en zijn achtergrond — gewoonlijk het wegdek — verschillend zijn.

De objecten zullen dus het beste opgemerkt kunnen worden wanneer we zorgen dat overal flinke contrasten optreden, bijvoorbeeld door te trachten alle objecten zeer donker tegen een helder wegdek te doen afsteken. Daar we echter, zooals reeds opgemerkt, verschillende factoren niet in de hand hebben, is dit lang niet altijd mogelijk. Onvermijdelijk zullen er van tijd tot tijd contrasten optreden, die zoo klein zijn, dat ze niet of nauwelijks opgemerkt kunnen worden.

Om het aantal gevallen waarin een object door deze oorzaak te laat of in het geheel niet opgemerkt wordt, tot het uiterste te beperken, zullen we dus moeten zorgen voor omstandigheden waarbij het nog juist waarneembare contrast zoo klein mogelijk is. Onder het juist waarneembare contrast verstaan we de verhouding $\Delta B : B$, waarbij $B$ de helderheid en $\Delta B$ het kleinste waarneembare helderheidsverschil is. $B : \Delta B$ noemen we de contrastgevoeligheid. Deze moeten we dus zoo groot mogelijk maken.

Van welke omstandigheden hangt nu de contrastgevoeligheid af?

In de eerste plaats van het helderheidsniveau. In *fig. 1* geeft de getrokken lijn het verband tusschen contrastgevoeligheid en helderheid aan [1] [1]). Bij de wegverlichtingsproblemen hebben we in hoofdzaak te maken met het gebied [2]) tusschen 0,1 en 1 kaars/m².

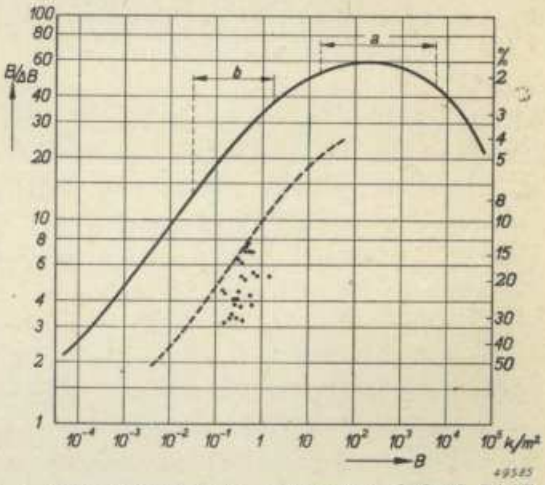



Fig. 1. Afhankelijkheid der contrastgevoeligheid $B/\Delta B$ van het helderheidsniveau $B$. Bij de wegverlichting (helderheidsgebied $b$) is deze geringer dan bij daglicht (gebied $a$).
Getrokken kromme: laboratoriumproef onder allergunstigste omstandigheden.
Gestippelde kromme: metingen in de natuur, uitgevoerd bij het invallen der duisternis.
Afzonderlijke meetpunten: metingen bij uitgevoerde goede wegverlichtingsinstallaties.

In dit gebied blijkt het quotient $B : \Delta B$ sterk toe te nemen met de helderheid; het varieert hier van 18 tot 33, hetgeen dus wil zeggen, dat contrasten van 3-5,5 % aan de grens van de waarneembaarheid liggen. De getrokken kromme van fig.1 is echter onder de meest gunstige laboratorium-omstandigheden gemeten, met groote lichtvlekken op een volkomen gelijkmatige achtergrond, bij een onbeperkte waarnemingstijd, en met de mogelijkheid van rustige en volledige concentratie, terwijl alle storende invloed van verblinding ontbrak.

---

[1]) De cijfers in rechte haakjes slaan op de publicaties vermeld in de literatuurlijst aan het eind van dit artikel.

[2]) 0,1 en 1 k/m² correspondeeren met de helderheden van een droog, lichtgekleurd betonnen wegdek (reflectievermogen 30 %) wanneer dit verlicht wordt met 0,1 resp. 1 lux (verlichtingsniveau bij volle maan = 0,2 lux).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Onder practische omstandigheden is de contrastgevoeligheid dan ook veel lager. De gestippelde lijn van fig. 1 geeft ons resultaten welke verkregen zijn onder omstandigheden die de practijk meer benaderen. Tijdens het invallen van de duisternis, bij gelijkmatig bewolkte hemel, werd namelijk op een weg zonder kunstmatige verlichting de contrastgevoeligheid gemeten [2] voor kleine objecten, die we onder dezelfde hoek waarnemen als een voetganger op 150 meter afstand. De natuur zorgde automatisch voor het doorloopen van de verschillende helderheidsniveaus. Onder deze omstandigheden blijkt de contrastgevoeligheid ruim een factor 3 lager te zijn geworden.

De ingeteekende punten in fig. 1 geven resultaten van metingen waarbij de practijk nog veel beter benaderd was. Elk punt geeft voor een bepaalde verlichtingsinstallatie de contrastgevoeligheid voor de bovengenoemde kleine voorwerpen aan en wel op het helderste gedeelte van het wegdek. De metingen hebben alle betrekking op „goede" verlichtingsinstallaties (met natrium- en kwikverlichting). Zij werden bij droog wegdek uitgevoerd [2]. Vergeleken bij de gestippelde kromme liggen al deze punten nog lager. Dit is te begrijpen: de ongelijkmatigheid van de helderheidsverdeeling en een zekere mate van verblinding zijn er hier als storende factoren bijgekomen (zie ook hieronder). Dat sommige punten bijna niet, andere vrij ver onder de kromme liggen, bewijst dat deze storende factoren bij de eene installatie in sterkere mate aanwezig zijn dan bij de andere. Bij in ieder opzicht goede installaties

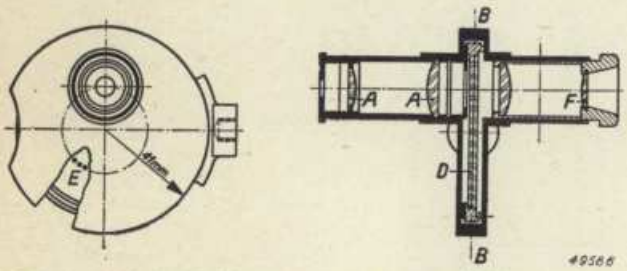



Fig. 2. Zichtbaarheidsmeter voor wegverlichting volgens Holst en Bouma.

zal de contrastgevoeligheid niet meer dan een factor $1^1/_2$ onder de gestippelde kromme liggen, zoodat ze bij een gemiddeld helderheidsniveau minstens $4^1/_2$ bedraagt (dwz. contrasten van ca 22 % zijn nog zichtbaar), terwijl bij hoogere helderheidsniveaus (zooals we ze veelal bij lichte betonwegdekken zien optreden) de contrastgevoeligheid tot 6 (17% waarneembaar contrast) kan stijgen, en onder gunstige omstandigheden nog hooger.

De boven omschreven metingen met kleine objecten zijn uitgevoerd met behulp van een zg. zichtbaarheidsmeter [3], waarvan *fig. 2* een afbeelding geeft. Een lenzenstelsel *AA* beeldt het wegdek af in het vlak *BB*. In dit vlak bevindt zich tevens een draaibare glasplaat *D*, waarop fotografisch een aantal stipjes *E* van verschillende zwarting

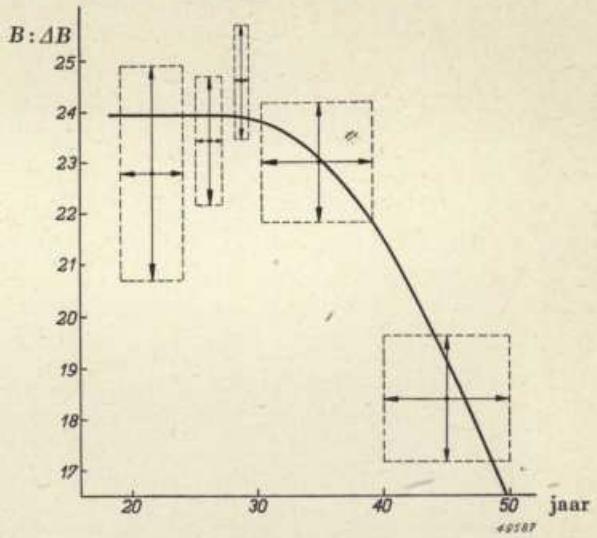



Fig. 3. Gemiddelde contrastgevoeligheid als functie van de leeftijd, gemeten bij een helderheidsniveau van 0,3 k/m², zonder verblindingsbron.

is aangebracht. Door het oog te plaatsen voor het oculair *F* ziet men wegdek en stipjes gelijktijdig scherp. Draait men nu de schijf *D*, dan kan men uit de verschillende passeerende stipjes het nog juist zichtbare uitzoeken en aldus de contrastgevoeligheid bepalen.

Het instrument is zoodanig geconstrueerd, dat men met de meter voor het oog de weg zooveel mogelijk onder dezelfde omstandigheden waarneemt als met het bloote oog (vergrooting 1 : 1, groot gezichtsveld, met eventueele verblindende lichtbronnen, kleine objecten, contrast donker op licht, enz.).

Tenslotte zij nog opgemerkt, dat de contrastgevoeligheid ook van de leeftijd afhankelijk is, zooals geïllustreerd wordt door de kromme in *fig. 3*, die ontleend is aan een onderzoek met 100 waarnemers onder laboratorium-condities [4]. De horizontale pijlen geven daarbij het leeftijdsgebied aan waarover telkens gemiddeld is, de verticale pijlen de individueele strooiing. Nog sterker komt deze afhankelijkheid van de leeftijd tot uitdrukking in de kromme van *fig. 4*, die de contrastgevoeligheid weergeeft tijdens de aanwezigheid van een sterke verblindingsbron.

We hebben tot dusverre alleen gesproken over „nog juist waarneembare" contrasten. In de practijk is het echter ook van groot belang om een bepaald,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



door twee verschillende helderheden gegeven contrast, dat ver boven deze drempelwaarde ligt, zoo opvallend mogelijk te maken. Hierdoor worden de objecten gemakkelijker opgemerkt en wordt het rijden op de weg minder inspannend. Men kan dit bereiken door te zorgen, dat er zoo weinig

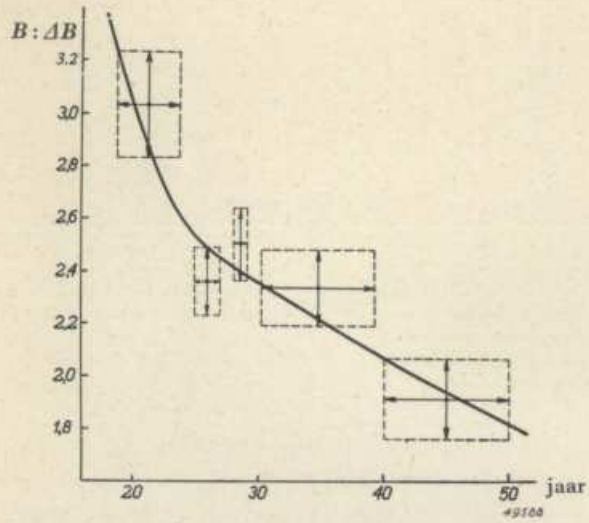



Fig. 4. Gemiddelde contrastgevoeligheid als functie van de leeftijd, gemeten bij een helderheidsniveau van 0,3 k/m², bij aanwezigheid van een verblindingsbron. De verblinding heeft een veel sterkere afneming van de contrastgevoeligheid bij hoogere leeftijd tengevolge.

mogelijk storende invloeden zijn, terwijl ook de keuze van de lichtsoort hier een rol speelt (zie aan het slot van dit artikel).

### Herkennen

Wanneer een object eenmaal opgemerkt is, zullen we het ook zoo spoedig mogelijk willen herkennen, daar het veelal van de aard van het voorwerp afhangt hoe we er op moeten reageeren (remmen, uitwijken, geluidssignaal geven). Dit herkennen hangt ten nauwste samen met de gezichtsscherpte, dwz. met het vermogen van ons oog om door het zien van kleine details de vorm van het voorwerp te kunnen waarnemen (gewoonlijk gaat het hier alleen om de omtrek van het object). We kunnen als maat voor de gezichtsscherpte $G$ nemen de omgekeerde waarde van de gezichtshoek waaronder een detail minstens gezien moet worden om waargenomen te worden, of een hiermee evenredige grootheid. Deze waarde $G$ wordt begrensd, eenerzijds door de structuur van ons netvlies, dus door de afmeting der afzonderlijke lichtgevoelige elementen, anderzijds door de afbeeldingsfouten van ons oog (sferische en chromatische aberratie, buiging, enz.). Opmerkelijk is, dat al deze oorzaken fouten van dezelfde grootte-orde geven: het oog is in dit opzicht een bewonderenswaardig compromis. De genoemde oorzaken hebben bijvoorbeeld tengevolge, dat bij het zien naar een figuur, die bestaat uit evenwijdige, afwisselend zwarte en witte strepen, de netvliesgedeelten waar de zwarte strepen op worden afgebeeld, ook nog wat licht ontvangen, zoodat het contrast niet 100 % maar misschien 70 % is.

Verlagen we het helderheidsniveau, dan blijkt $G$ af te nemen [5]. *Fig. 5* illustreert deze afneming en wel voor verschillende lichtsoorten.

De oorzaak van dit afnemen ligt ten deele in het toenemen van de pupilgrootte; bij helderheidsniveaus zooals zij bij wegverlichting optreden, is de pupildiameter ongeveer $2^1/_2$ maal zoo groot als bij daglicht en hierdoor wordt de invloed van de afbeeldingsfouten grooter.

Bij zeer lage helderheden wordt de gezichtsscherpte bovendien beïnvloed door de overgang van kegeltjeszien op staafjeszien (zie hieronder).

Onder laboratorium-omstandigheden en bij hooge helderheden kan men details onder een gezichtshoek van ca 1 boogminuut nog juist waarnemen. Bij de wegverlichting zal men zelfs onder gunstige omstandigheden niet veel lager dan 3 boogminuten kunnen komen. (Dit is de hoek, waaronder men op 150 m afstand een voorwerp van 13 cm ziet.)

### Snel herkennen

Vooral bij snelverkeer is het van groot belang dat de voorwerpen op de weg snel herkend worden.

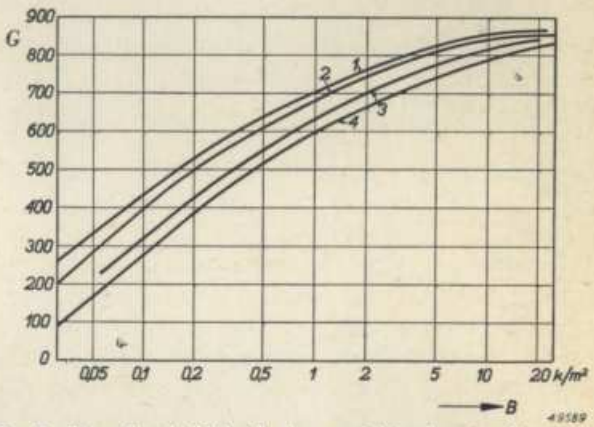



Fig. 5. De afhankelijkheid der gezichtsscherpte $G$ van de helderheid $B$, voor verschillende lichtsoorten, nl. *1* voor kwiklicht, *2* voor natriumlicht, *3* voor neonlicht, *4* voor gloeilampenlicht. De waarde van de gezichtsscherpte $G$ is hier uitgedrukt als de afstand in cm, waarop men cirkeltjes en vierkantjes van 1 cm diameter nog kan onderscheiden. De waarde $G = 690$ correspondeert zoodoende met het nog kunnen zien van een detail onder een gezichtshoek van ongeveer 1′.

Het gaat hierbij feitelijk om de totale tijd die verloopt, tusschen het moment waarop het object onder een voor het waarnemen voldoend gunstige conditie in het gezichtsveld verschijnt, en het tijdstip waarop de reactie op het geziene plaats heeft (remmen, uitwijken, enz.). Deze tijd kunnen we in vier stukken verdeelen:

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



a) De tijd die noodig is voor het opbouwen van het beeld op het netvlies.

Deze hangt (evenals bij de fotografische plaat) sterk af van de intensiteit van het licht. We kunnen hieromtrent iets te weten komen door de tijd $\tau$ te meten gedurende welke een object zichtbaar moet zijn geweest om later herkend te worden, $\tau$ is dus analoog met de benoodigde belichtingstijd bij de fotografische plaat. De waarde $1/\tau$ wordt veelal de waarnemingssnelheid genoemd. *Fig. 6* geeft het verband tusschen $1/\tau$ en de helderheid $B$ weer en wel kromme *1* voor natriumlicht en kwiklicht, kromme *2* voor gloeilampenlicht. We zien dat we bij hooge helderheden met uiterst kleine waarden van $\tau$ te maken krijgen, terwijl bij de helderheidsniveaus op de weg (0,1-1 k/m²) de tijd $\tau$ gewoonlijk tusschen 1/4 en 1/20 sec ligt;

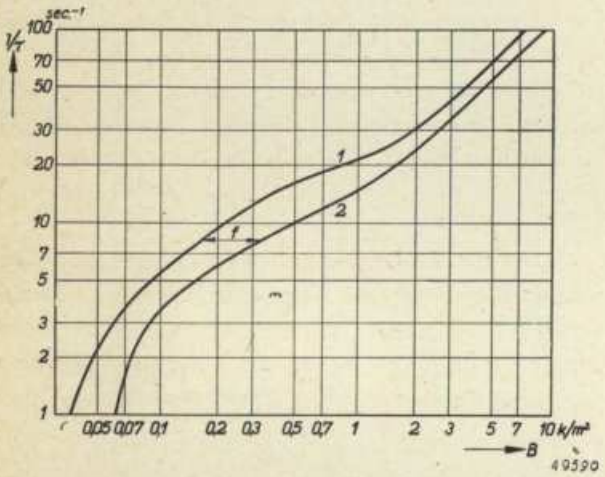



Fig. 6. De afhankelijkheid der waarnemingssnelheid $1/\tau$ van de helderheid bij rustende voorwerpen.
*1* voor natriumlicht en kwiklicht,
*2* voor gloeilampenlicht.
Voor eenzelfde waarnemingssnelheid moet in geval *2* de helderheid een factor $f \approx 2$ maal zoo groot zijn als in geval *1*.

bij slecht contrasteerende voorwerpen, of bij sterke storing door verblinding, kunnen nog aanmerkelijk langere tijden optreden.

Fig. 6 geldt voor rustende voorwerpen [6], *fig. 7* geeft analoge krommen voor bewegende voorwerpen, nl. objecten die aan een spleet voorbij flitsen (waarnemingen van Weigel [7]). Daar de snelheid van bewegen evenredig met $1/\tau$ werd opgevoerd, kunnen hier niet zulke lage waarden van $\tau$ gevonden worden. In fig. 7 stelt *1* het resultaat bij natriumlicht voor, *2* voor gloeilampen, *3* voor kwiklicht. Dat de volgorde hier anders is dan in fig. 6 behoeft ons niet te verbazen, want hier gaan geheel andere factoren (nabeelden, uitdooven van het netvliesbeeld enz.) een rol spelen.

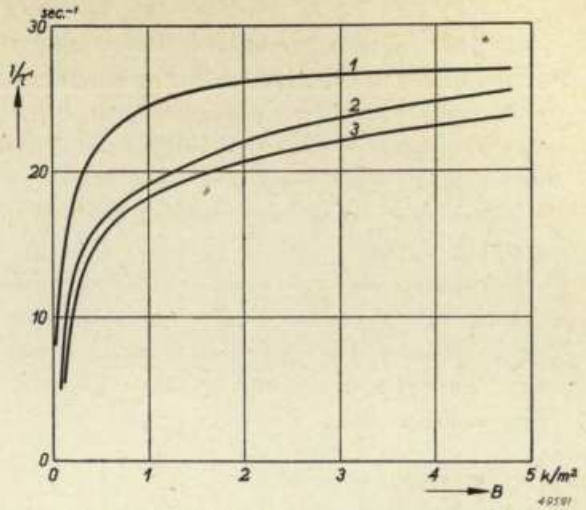



Fig. 7. De afhankelijkheid der waarnemingssnelheid $1/\tau$ van de helderheid bij bewegende voorwerpen (volgens Weigel).
*1* voor natriumlicht,
*2* voor gloeilampenlicht,
*3* voor kwiklicht.

b) De tijd gedurende welke het beeld ons bewust wordt en herkenning van het voorwerp plaats heeft. De duur van deze tijd hangt samen met de duidelijkheid en opvallendheid van het beeld en vooral ook daarvan of het iets alledaagsch betreft of niet.

Omtrent de orde van grootte van de hier optredende tijden leeren ons metingen van de leessnelheid iets. *Fig. 8* toont ons (kromme *1* en *2* resp. voor natrium- en gloeilampenlicht) het aantal letters per seconde van een gemakkelijk te begrijpen tekst, dat men bij goede druk zonder bijzondere inspanning kan lezen [6]. Bij zeer hooge helderheden komt men tot 30 letters per seconde. Wat we hier feitelijk meten, is het verloop met de helderheid van de som der tijden

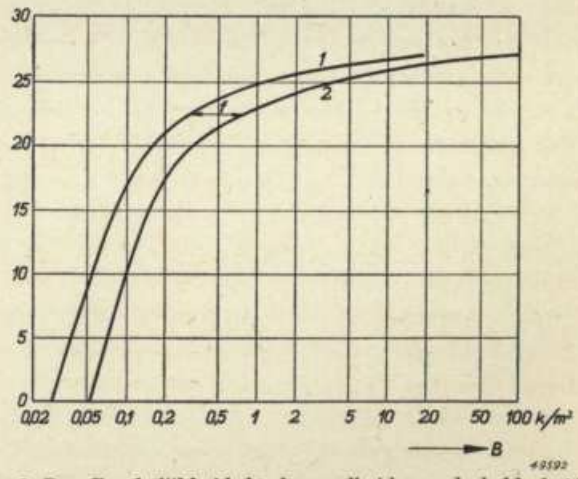



Fig. 8. De afhankelijkheid der leessnelheid van de helderheid. Als maat voor de leessnelheid is uitgezet het aantal letters dat onder bepaalde omstandigheden per seconde kan worden gelezen.
*1* voor natriumlicht,
*2* voor gloeilampenlicht.
Ook hier is de factor $f \approx 2$ (vgl. fig. 6).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



(a) en (b). Bij zeer groote helderheden speelt de tijd (b) de hoofdrol, bij kleine helderheden (wegverlichting) zijn beide onderdeelen van belang.

c) De tijd waarin — bewust of onbewust — het overleg plaats heeft: wat moet ik doen?

d) De tijd, noodig voor het inschakelen van de reactie.

Deze laatste twee tijden hebben niets meer met het oog te maken en worden mede beïnvloed door psychologische oorzaken (schrik, concentratie, afleiding, moeilijkheid van het probleem, vermoeidheid, enz.).

**Storende invloeden: verblinding**

In het algemeen stoort een bepaalde verblindende lichtbron des te meer, naarmate het algemeene helderheidsniveau lager is, en naarmate de te verrichten visueele taak moeilijker is. Hieruit volgt, dat we bij de lage helderheden van de wegverlichting en in het bijzonder bij snelverkeerswegen moeten trachten deze storende invloed tot een minimum te beperken. De verblinding kan zich op verschillende manieren uiten:

a) *Verblinding maakt de prestaties van het oog slechter.*

We geven eenige voorbeelden van deze vorm van storing (tijdens de aanwezigheid van de verblindingsbron).

Voorbeeld 1: Laat op 2 meter naast een zich op 30 meter afstand bevindend object een lichtbron staan, die 810 kaars in de richting van ons oog straalt, en dus 0,9 lux op het oog werpt. Volgens gangbare opvattingen noemt men een dergelijke lichtbron „juist hinderlijk verblindend" [8]. Bij normale helderheid van het wegdek blijkt door deze verblinding de contrastgevoeligheid met een factor 2,3 gedaald te zijn. Hoe ernstig dit is, blijke uit de opmerking, dat we eenzelfde achteruitgang ook zouden bereiken wanneer we het verlichtingsniveau niet minder dan met een factor 15 verlaagden! Hierbij is dan nog aangenomen, dat het oog het object blijft fixeeren en niet bij ongeluk even recht in de lichtbron kijkt. De gezichtsscherpte daalt door deze mate van verblinding veel minder, nl. ca 15%. Dit is een algemeen verschijnsel: de contrastgevoeligheid gaat door verblinding veel meer achteruit dan de gezichtsscherpte. De verblinding doet de voorwerpen niet zoo zeer onduidelijk van vorm worden, maar ze doet ze veelal geheel verdwijnen tegen de achtergrond.

Voorbeeld 2: Om een denkbeeld te geven, welke mate van verblinding bij een modern uitgevoerde wegverlichtingsinstallatie, met goed afgeschermde lichtbronnen, nog op kan treden, nemen we aan, dat het horizontaal gerichte oog getroffen wordt door het onder 70° met de verticaal uitgestraalde licht van een lichtbron (natriumlamp in email reflector) die in deze richting een lichtsterkte van 850 kaars heeft. Het hierbij op het oog vallend licht doet de contrastgevoeligheid ongeveer 10 % dalen, een daling die ook zou ontstaan wanneer we het helderheidsniveau met een factor $1^1/_2$ verminderden. Dit geeft dus de mate van verblinding, die men bij goed uitgevoerde installaties nog toelaat om niet al te oneconomisch te verlichten. Bij verscheidene uitgevoerde installaties treft men een vele malen grootere verblinding aan.

Voorbeeld 3: Omtrent de storende invloed van tegenliggers bij druk verkeer — zelfs met gedimde lichten — geeft *tabel I* ons een indruk [2]. Voor

**Tabel I.**

| Kleinst waarneembare contrast | | Verhouding |
|---|---|---|
| Met verkeer: | Zonder verkeer: | |
| $29^{50}/_{0}$ | $16^{50}/_{0}$ | 1,8 : 1 |
| 44% | $12^{50}/_{0}$ | 3,5 : 1 |
| 25% | $14^{50}/_{0}$ | 1,7 : 1 |
| $28^{50}/_{0}$ | 10% | 2,8 : 1 |

een viertal verschillende installaties is het kleinst waarneembare contrast (met de boven beschreven zichtbaarheidsmeter) gemeten, zoowel met als zonder verkeer. We zien dat de contrastgevoeligheid voor kleine objecten door deze oorzaak gemiddeld een factor 2 daalt.

b) *Nawerking, nabeelden*

Ook nadat de verblindende lichtbron uit het gezichtsveld verdwenen is, kan de storende invloed nog eenige tijd blijven bestaan (successief-verblinding). We komen hier nog nader op terug.

c) *Hinderlijkheid*

Een derde uitingsvorm van de verblinding is van meer psychologische aard: het algemeene gevoel van hinderlijkheid, ergernis, afleiden van de aandacht. Deze factoren kunnen moeilijk gemeten en in cijfers weergegeven worden. Hier gaan we dus niet verder op in.

**Storende invloeden: ongelijkmatigheid**

Ook de ongelijkmatigheid van de helderheidsverdeeling op het wegdek kan een zeer storende invloed uitoefenen, die zich uit in een achteruitgang van de prestaties van ons oog [2]. Ter illustratie hiervan diene *tabel II*. Voor een bepaalde installatie (natriumverlichting, asfaltwegdek) is bij ver-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



schillende vochtigheidstoestanden van het wegdek het nog juist waarneembare contrast met de zichtbaarheidsmeter gemeten, en wel: $c_1$ op de helderste plek van het wegdek, $c_2$ op de donkerste plek. Nu zien we bij toenemende vochtigheid de donkere plekken steeds donkerder, de lichte plekken steeds helderder maar ook kleiner worden. Het is dus zeer begrijpelijk, dat $c_2$ toeneemt. We zien echter uit de tabel, dat ook $c_1$ bij toenemende vochtigheid grooter wordt. Hier blijkt dus, dat de nadeelige invloed van de toenemende ongelijkmatigheid van de helderheidsverdeeling de gunstige invloed van de toeneming van de helderheid zelve overtreft!

**Tabel II.**

| Toestand van wegdek | Kleinst waarneembare contrast | |
|---|---|---|
| | $c_1$ | $c_2$ |
| Droog | 17 | 31 |
| Iets vochtig | 24 | 43 |
| Vochtig | 28 | 48 |
| Nat | 36 | — |

In doorsnee kunnen we zeggen, dat bij een installatie met afgeschermde lichtbronnen en droog wegdek de storende invloed van de verblinding door de vaste lichtbronnen op de contrastgevoeligheid, zooals we boven hebben gezien, dezelfde is als die van een helderheidsverlaging met een factor $1^1/_2$, terwijl de storende invloed van de ongelijkmatigheid gelijkwaardig is met een helderheidsvermindering met een factor 2. Dit klopt met fig. 1, waar de gemeten punten gemiddeld een factor 3 rechts van de gestippelde kromme liggen.

Tenslotte kan de ongelijkmatigheid nog verschillende storingen van meer psychologische aard veroorzaken, die we niet nader zullen bespreken. Als voorbeelden noemen we:

Bepaalde lichtvlekken, die ons verkeerde dingen suggereeren. De omstandigheid of we het wegdek al dan niet als één geheel kunnen overzien. Afleiding, vermoeidheid, enz.

### Welke rol speelt elk onderdeel?

In het bovenstaande is het proces van het zien bij lage helderheden in een aantal onderdeelen ontleed. De vraag doet zich voor, welke onderdeelen van het meeste belang zijn voor het zien op de weg. In het algemeen kunnen we zeggen, dat alle behandelde factoren een belangrijke rol spelen.

Eenige oneenigheid bestaat in de literatuur omtrent de vraag of ook de gezichtsscherpte en de daarmee in nauw verband staande waarnemingssnelheid een belangrijke factor is. Dit hangt in sterke mate af van de snelheden, waarmee op de weg gereden wordt. Naarmate de snelheden toenemen, zal men de voorwerpen op steeds grootere afstand, dus onder steeds kleinere gezichtshoeken moeten kunnen herkennen, zoodat de gezichtsscherpte een steeds belangrijkere rol gaat spelen. Daar bij groote snelheden reactievertragingen ter grootte van onderdeelen van seconden catastrofale gevolgen kunnen hebben, wordt hier ook de waarnemingssnelheid van veel grooter belang. De visueele taak wordt bij grootere snelheden steeds moeilijker, zoodat men vooral op de snelverkeerswegen bijzondere zorg moet besteden aan het minimaal maken van de verschillende storende invloeden.

We merken nog op, dat bij de metingen met de boven beschreven zichtbaarheidsmeter een aantal der bestudeerde factoren (contrastgevoeligheid, gezichtsscherpte, verblinding) in de juiste verhouding tot uitdrukking komen.

### Purkyně effect

In verschillende opzichten is het voor het zien op de weg van groote beteekenis, dat in ons oog twee verschillende soorten van lichtgevoelige elementen aanwezig zijn, de staafjes en de kegeltjes. Behalve in hun vorm, waaraan zij hun naam ontleenen, onderscheiden zich deze elementen o.m. nog in de volgende opzichten:

a) Door hun verschillende plaatsing in het netvlies. In het midden van het netvlies, binnen een cirkeltje van enkele tienden millimeters, bevinden zich uitsluitend kegeltjes, dichter bij de randen van het netvlies alleen staafjes; daartusschen heeft een geleidelijke overgang plaats. Het deel van het netvlies waar zich de kegeltjes bevinden is tevens het deel, waarmee we het scherpste zien. Daarom fixeeren we voorwerpen die we precies willen bekijken.

b) Door hun kleuronderscheidingsvermogen. De kegeltjes zijn in staat om kleurverschillen waar te nemen, de staafjes niet.

c) Door het verschillende helderheidsgebied waarin ze relatief het best functionneeren. Bij hooge helderheden zien we vrijwel uitsluitend met de kegeltjes, bij zeer lage helderheden alleen met de staafjes. Daartusschen bevindt zich een overgangsgebied, waarin beide soorten van elementen in belangrijke mate tot het zien bijdragen. Ter orienteering diene het volgende overzicht:
Helderheidsniveau overdag: uitsluitend kegeltjeszien.
Helderheidsniveau binnenverlichting: meestal uitsluitend kegeltjeszien.
Helderheidsniveau wegverlichting: gemengd zien, in hoofdzaak met de kegeltjes.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



Helderheidsniveau bij volle maan: gemengd zien, in hoofdzaak met de staafjes.
Helderheidsniveau maanlooze sterrennacht: uitsluitend staafjeszien.

d) Door hun verschillende ooggevoeligheidskromme. In *fig. 9* geeft *A* de ooggevoeligheidskromme in het geval van kegeltjeszien, *B* die in het geval van staafjeszien. In het geval van gemengd zien geldt een tusschenliggende kromme.

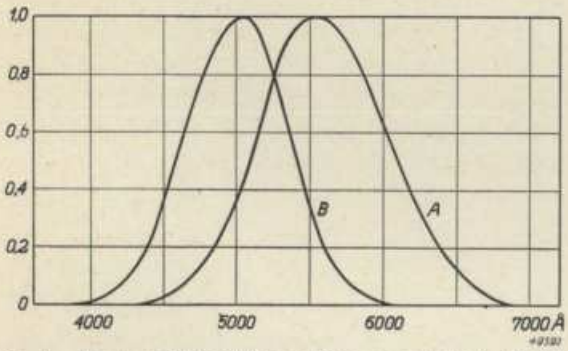



Fig. 9. Ooggevoeligheid (in relatieve eenheden) als functie van de golflengte (in Å), voor het zien met kegeltjes (*A*) en voor het zien met staafjes (*B*).

De kegeltjes zijn blijkbaar het gevoeligste voor het geelgroen, de staafjes voor het blauwgroen. Deze verschillende helderheidswaardeering der kleuren heeft een belangrijk gevolg: wanneer men een aantal kleuren geeft, die alle de indruk maken van even helder te zijn, en men gaat vervolgens de uitgestraalde hoeveelheid licht voor alle kleuren met eenzelfde groote factor verminderen, dan blijken de kleuren niet meer de indruk van „even helder" te geven. De veranderde helderheidswaardeering voor de verschillende kleuren heeft ten gevolge, dat de blauwachtige kleuren helderder, de roodachtige kleuren minder helder schijnen dan de andere (Purkyně effect).

Zouden we met de helderheden zoo laag gaan, dat we met zuiver staafjeszien te maken kregen, dan zou dit ten slotte beteekenen, dat de roodachtige lichtsoorten minder efficient zouden worden. In de practijk van de wegverlichting bevindt men zich echter in het bovenste gedeelte van het overgangsgebied; past men een roodachtige lichtbron (bijv. natriumlicht) toe, dan zal dit „achterblijven in helderheid" dus alleen voor de donkerste gedeelten van het gezichtsveld, niet voor de lichte partijen optreden. Het gevolg is, dat de donkere objecten extra zwart tegen het veel lichtere wegdek gaan afsteken: de contrasten worden opvallender (contrastrijkheid).

Tenslotte merken we nog op, dat ook bij de bestudeering der verblindingsverschijnselen het onderscheid tusschen staafjes en kegeltjes van belang is, daar we meestal zooveel mogelijk met de kegeltjes trachten waar te nemen, terwijl het verblindende licht veelal in hoofdzaak de staafjes treft.

## Invloed van de kleur op het zien

In het onderstaande geven we nog een kort overzicht van de invloed van de kleur van het licht op de verschillende factoren van het zien. We beperken ons daarbij tot de drie belangrijkste lichtsoorten: gloeilampenlicht, kwiklicht, natriumlicht.

a) Invloed op de contrastgevoeligheid.
Weinig verschil tusschen de drie lichtsoorten.

b) Opvallendheid van grootere contrasten.
In dit opzicht biedt het natriumlicht belangrijke voordeelen (zie boven).

c) Gezichtsscherpte.
In dit opzicht overtreffen kwiklicht en natriumlicht het gloeilampenlicht; zie fig. 5 (*1* kwik, *2* natrium, *4* gloeilampen).

d) Waarnemingssnelheid van rustende objecten.
Ook hier overtreffen kwiklicht en natriumlicht het gloeilampenlicht; zie fig. 6 (*1* kwik en natrium, *2* gloeilampen).

e) Waarnemingssnelheid van bewegende voorwerpen.
In dit opzicht is natriumlicht beter, kwiklicht slechter dan gloeilampenlicht; zie fig. 7 (*1* natrium, *2* gloeilampen, *3* kwiklicht).

Opgemerkt zij nog, dat men op de weg meer met geval (d) dan met geval (e) te maken heeft, daar de bewegingen op de weg grootendeels naar ons toe of van ons af gericht zijn: transversaal verplaatsen de objecten zich weinig in ons gezichtsveld.

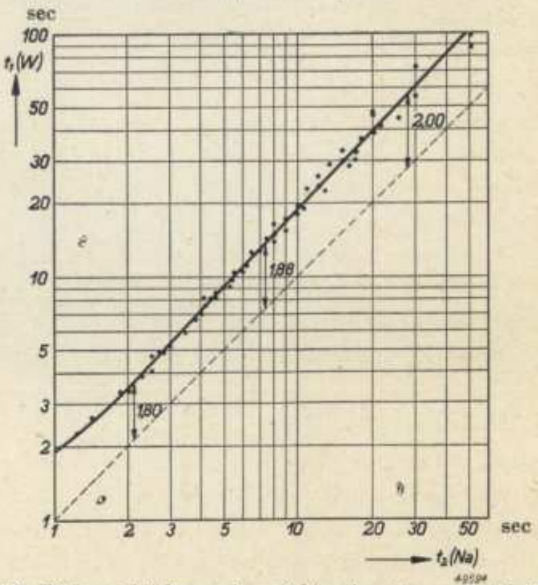



Fig. 10. De hersteltijd voor de gezichtsscherpte, na verblinding, is afhankelijk van de kleur van het licht. Zij is bij verblinding door wit licht ($t_1$) ongeveer twee maal zoo groot als bij verblinding door natriumlicht ($t_2$).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



f) Verblinding; invloed op gezichtsscherpte en contrastgevoeligheid.
Hier bestaat weinig verschil tusschen de drie lichtsoorten.

g) Verblinding; nawerking.
*Fig. 10* geeft metingen weer van de hersteltijd voor de gezichtsscherpte, dus de tijd die na het verdwijnen van de verblindingsbron moet verloopen, voordat de gezichtsscherpte een zekere waarde herkregen heeft. In verticale richting is deze hersteltijd uitgezet voor het geval dat met gloeilampenlicht verblind werd, in horizontale richting de hersteltijd bij een proef onder dezelfde omstandigheden, maar met verblinding door natriumlicht. Elk ingeteekend punt legt dus de hersteltijden $t_1$ en $t_2$ vast die bij een analoge proef optreden voor „wit-verblinding" en voor „natrium-verblinding". Bestond er geen verschil tusschen beide lichtsoorten, dan zouden alle punten op de gestippelde lijn $(t_1 = t_2)$ moeten liggen. Uit de figuur zien we, dat in doorsnee de hersteltijden $t_1$ voor wit licht een factor 1,8-2,0 grooter zijn dan de overeenkomstige tijden $t_2$ voor natriumlicht [9].

h) Verblinding; psychologische effecten.
Over het algemeen ondervindt men geel licht als minder storend dan wit licht. Er bestaan echter individueele verschillen.

i) Proeven met de zichtbaarheidsmeter.

In *tabel III* vindt men de gemiddelde resultaten, die door metingen met de zichtbaarheidsmeter bij een groot aantal uitgevoerde installaties werden verkregen [2]. $c_1$ duidt weer het nog juist waarneembare contrast (in %) aan voor het helderste deel van het wegdek, $c_2$ voor het donkerste deel. Daarnaast zijn nog het gebruikte vermogen per km, en de door de lampen per meter weglengte uitgestraalde lumens opgegeven. De laatstgenoemde grootheid was voor de verschillende lichtsoorten vrijwel hetzelfde.

**Tabel III.**

| Lichtsoort | Toestand van de weg | $c_1$ (%) | $c_2$ (%) | kW/km | lm/m |
|---|---|---|---|---|---|
| Natrium | droog | 17,2 | 31,2 | 3,3 | 200 |
| Kwik | droog | 26,0 | 35,4 | 6,4 | 220 |
| Menglicht | droog | 21,4 | 35,3 | 10,8 | 230 |
| Natrium | vochtig | 24,1 | 44,3 | 3,4 | 210 |

We zien uit de tabel, dat de resultaten voor de natriuminstallaties die voor de kwiklicht- en menglichtinstallaties overtreffen, ondanks het veel kleinere toegepaste vermogen. Ook blijkt opnieuw, dat bij het vochtig worden van het wegdek zoowel $c_1$ als $c_2$ toenemen, dus de contrastgevoeligheid zoowel voor de lichte als voor de donkere gedeelten van het wegdek afneemt.

Tabel III vermeldt geen gloeilampeninstallaties. Weliswaar hebben we hiervoor ook resultaten verzameld — deze waren belangrijk slechter dan de in tabel III opgegevene — maar een zuivere vergelijking was hier niet mogelijk, omdat de meeste gloeilampeninstallaties ook in andere opzichten belangrijk van de natrium- en kwik-installaties afweken.

## LITERATUURLIJST


[1] P. J. Bouma, Eigenschappen van het oog in verband met hun beteekenis voor de wegverlichting, Philips techn. T. 102-106, 1936.

[2] P. J. Bouma, Metingen aan uitgevoerde wegverlichtingsinstallaties, Philips techn. T. **4**, 304-313, 1939.

[3] G. Holst en P. J. Bouma, Ein neues Messgerät zur Beurteilung der Güte einer Strassenbeleuchtung, Physica **3**, 1159-1163, 1936.
G. Holst en P. J. Bouma, Hoe beoordeelt men de kwaliteit van een wegverlichting? Philips techn. T. **1**, 353-356, 1936.

[4] P. J. Bouma, Het verblindingsprobleem bij de wegverlichting, Philips techn. T. **1**, 225-229, 1936.
P. J. Bouma, Aanvullende mededeelingen over eenige eigenschappen van het oog, De Ingenieur **55**, G10-12, 1940.

[5] P. J. Bouma, Gezichtsscherptemetingen bij diverse lichtsoorten, De Ingenieur **49**, A243-246, 1934.

[6] P. J. Bouma, Gezichtsscherpte en waarnemingssnelheid bij wit licht en natriumlicht, De Ingenieur **49**, A31-34, 1934.

[7] R. G. Weigel, Untersuchungen über die Sehfähigkeit im Natrium- und Quecksilberlicht insbesondere bei der Strassenbeleuchtung, Das Licht **5**, 211-216, 1935.

[8] P. J. Bouma, Verblinding, Natuur en Mensch **56**, 217-221, 1936.
P. J. Bouma, Verblinding, Polytechn. Weekbl. **29**, 625-629, 1935.

[9] P. J. Bouma, Contrastrijkheid bij natriumlicht, kwiklicht en wit licht, De Ingenieur **49**, A290-294, 1934.


Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



# BOEKBESPREKING

**Kleuren en kleurindrukken,** door P. J. Bouma, 320 blz., 113 figuren en 15 tabellen, Philips Technische Bibliotheek, Meulenhoff & Co. N.V., Amsterdam 1946.

In dit op bevattelijke wijze geschreven boek (de auteur onderstelt bekendheid met wis- en natuurkunde op H.B.S.-niveau plus een zekere dosis vlijt!) wordt het kleurenprobleem aangevat van de zijde der experimenteele natuurkunde en der verlichtingskunde. Andere aspecten van het veelzijdige gebied der kleurenleer, die verband houden met physiologie en psychologie, worden slechts in zooverre besproken als dit voor een juist begrijpen noodzakelijk is. Ook daar wordt zooveel mogelijk op experimenteele grondslagen gebouwd. Van een behandeling van het aesthetische aspect is geheel afgezien alsmede van de bespreking van physica en chemie der kleurstoffen.

Van de veertien hoofdstukken, die ieder ongeveer tien paragrafen omvatten, zijn de eerste zes gewijd aan de eigenlijke kleurenleer: de rol van het oog, het helderheidsbegrip, de kleurendriehoek en de kleurenruimte. In tegenstelling met hetgeen meestal geschiedt, is de auteur, in navolging van Schrödinger, er toe gekomen het gebruik van de kleurenruimte als basis voor de kleurenleer in eere te herstellen. Aan de hand van de kleurenruimte worden de wetten van Grassmann voor de additieve menging van kleuren uitvoerig besproken. Hierop volgt dan een uiteenzetting van het internationale (C.I.E.) coördinatenstelsel *XYZ*, toegelicht met een aantal rekenvoorbeelden [1]).

De verdere hoofdstukken zijn gewijd aan bijzondere onderwerpen. Hoofdstuk VII behandelt eenige speciale gevallen, zooals de kleuren van zwarte stralers, de randkleuren, welke optreden bij breking door een prisma, de ideale remissiekrommen, de zg. optimale kleuren (emissiekleuren van maximale helderheid) en de karakteristieke of kleurrijkste kleuren (k-kleuren).

De hoofdstukken VIII en IX geven een overzicht van objectieve en subjectieve colorimetrische methoden en van de daarbij gebruikte instrumenten.

In hoofdstuk X worden de afwijkingen van de normale kleurenzin beschreven en de wetten, waaraan deze gehoorzamen, alsmede de erfelijkheid van deze afwijkingen.

In hoofdstuk XI passeeren de hoofdfiguren van de geschiedenis der kleurenleer de revue, met telkens een korte beschrijving van hun bijdrage tot deze wetenschap: Newton, Goethe, Young, Grassmann, Maxwell, Helmholtz, A. König, Hering, Guild, Wright, Schrödinger, Ostwald.

In de hoofdstukken XII en XIII worden een aantal kwesties besproken die niet direct tot het gebied der colorimetrie behooren, nl. die gevallen, waarin men meer te maken heeft met het begrip „kleurindruk". Hiertoe behoort het waarnemen van kleurverschillen en de nadere bestudeering van het karakter der kleurindrukken, in het bijzonder het verschijnsel van simultaan contrast en de chromatische aanpassing van het oog aan een gekleurde omgeving of aan een verlichting met min of meer gekleurd licht.

Ten slotte behandelt hoofdstuk XIV eenige belangrijke toepassingsgebieden, met name de verlichtingskunde, de toepassingen in handel, industrie en wetenschap (beschrijving van de kleuren van producten en van kleurmonsters in trichromatische coördinaten, toepassing van kleurcoördinaten voor de beschrijving van physische verschijnselen) en eindelijk het probleem der kleurenreproductie.

Een aanhangsel bevat 15 tabellen, een ca 400 literatuuropgaven omvattende literatuurlijst, een lijst van gebruikte symbolen en een slagwoordenregister.

W. de Groot.

[1]) Het nut der additieve mengwetten wordt van sommige zijden wel eens in twijfel getrokken. Inderdaad is het aantal gevallen waarin men uitsluitend met deze mengwetten te maken heeft, beperkt. In vele gevallen staat men voor vragen die tot het gebied der subtractieve of multiplicatieve kleurvorming behooren. De karakteriseering van een kleur door drie getallen helpt dan niet veel en men is gedwongen om terug te grijpen naar de spectrale verdeelingsfunctie van de lichtbron gecombineerd met de spectrale doorlatingskromme of spectrale remissiekromme van een filter of van verfstoffen. Bovendien krijgt men in de practijk veelal te maken met de invloed van de kleurindruk, die afhankelijk is van de omgeving. De mogelijkheid om, vrijwel onafhankelijk van de omgeving, een kleur door drie coördinaten vast te leggen, levert echter een hulpmiddel dat men nooit zal kunnen en willen ontberen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



# OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties verstrekt de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, op aanvrage gratis overdrukken. Van de publicaties die met een sterretje * zijn gemerkt, is echter geen voor verspreiding voldoende aantal overdrukken beschikbaar.

**1703:** W. de Groot: The influence of irradiation with light on the dielectric properties of ZnS phosphors (Physica 's-Gravenhage **12**, 402-404, 1946).

Er worden proeven beschreven, waarbij tegelijkertijd de invloed van bestraling met licht op de lichtemissie en op de diëlectrische eigenschappen van zinksulfide-fosforen wordt onderzocht. Het blijkt dat de capaciteitsverandering van een ZnS bevattende condensator bij bestraling en de teruggang daarvan bij het beëindigen der bestraling veel langzamer gaan dan de toeneming en de afneming der lichtemissie. Er worden eenige experimenten aangehaald, die er voor pleiten, dat de verandering in diëlectrisch gedrag moet worden toegeschreven aan vrije, en niet aan invangplaatsen gebonden, electronen. Sommige verschijnselen, zooals een aanvankelijk steile afval van de capaciteitsverandering bij een fosfor met „killer", blijven onverklaard.

**1704*:** P. J. Bouma: Kleuren en kleurindrukken (Philips Technische Bibliotheek; uitg. Meulenhoff & Co. N.V., Amsterdam 1946, 320 blz., 113 fig.).

Zie de boekbespreking op pag. 159 in dit nummer.

---

Het laatst verschenen nummer van *Philips Research Reports* (Vol. 2, No. 1, Februari 1947) bevat de volgende artikelen:

*R 32:* B. D. H. Tellegen: Coupled circuits.

*R 33:* W. Elenbaas: On the excitation temperature, the gas temperature, and the electron temperature in the high-pressure mercury discharge.

*R 34:* H. B. G. Casimir: On the theory of eddy currents in ferromagnetic materials.

*R 35:* H. C. Hamaker: Radiation and heat conduction in light-scattering material.

*R 36:* H. A. Klasens: The light emission from fluorescent screens irradiated by X-rays.

Degenen die voor een der bovenvermelde artikelen belangstelling hebben, kunnen zich wenden tot de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, waar een beperkt aantal overdrukken voor gratis verspreiding ter beschikking is.

Voor een abonnement op Philips Research Reports wende men zich tot den uitgever van het Philips Technisch Tijdschrift.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!